



HAL
open science

Textiles à base de fibres naturelles d'origine marocaine pour application matériaux composites

Zineb Samouh

► **To cite this version:**

Zineb Samouh. Textiles à base de fibres naturelles d'origine marocaine pour application matériaux composites. Autre [cond-mat.other]. Centrale Lille Institut; Université Chouaïb Doukkali. Faculté des sciences (El Jadida, Maroc), 2021. Français. NNT : 2021CLIL0026 . tel-03976587

HAL Id: tel-03976587

<https://theses.hal.science/tel-03976587>

Submitted on 7 Feb 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE
présentée en vue
d'obtenir le grade de

DOCTEUR

En

Spécialité : Mécanique des solides, des matériaux, des structures et des surfaces

Par

ZINEB SAMOUH

DOCTORAT délivré conjointement par CENTRALE LILLE et UNIVERSITÉ CHOUAIB DOUKKALI

Titre de la thèse :

**Textiles à base de fibres naturelles d'origine marocaine pour
application matériaux composites**

Soutenue le 17/12/2021 devant le jury d'examen :

Président du jury	M Saïd GMOUH	PES	Faculté des Sciences Ben M'Sik-Casablanca
Rapporteuse	Mme Mina OUMAM	PES	Faculté des Sciences Ben M'Sik- Casablanca
Rapporteur	M Pierre OUAGNE	PU	ENI-Tarbes
Examineur	M Michel TOURLONIAS	PU	ENSISA-Mulhouse
Directeur de thèse	M François BOUSSU	PU	ENSAIT-Roubaix
Co-directeur de thèse	M Reddad EL MOZNINE	PU	Faculté des sciences- EL Jadida
Invité	M Omar CHERKAOUI	Dr	ESITH-Casablanca
Invité	M Damien SOULAT	PU	ENSAIT-Roubaix

Thèse préparée dans le laboratoire GEMTEX à l'ENSAIT- Roubaix,
le laboratoire LPMC à la Faculté des sciences d'El Jadida
et le laboratoire REMTEX à l'ESITH de Casablanca
École Doctorale SPI 072

Remerciements

Ce travail de thèse s'inscrit dans le cadre du Partenariat Hubert-Curien (PHC) Toubkal/19/83 - Campus France 41511ZF. Ce partenariat de recherche a conduit à une collaboration entre le Laboratoire de la Physique de la matière Condensée de la Faculté des Sciences d'El Jadida de l'Université Chouaib Doukkali au Maroc, le Laboratoire de Recherche des Matériaux Textiles de l'ESITH à Casablanca au Maroc et le Laboratoire de Génie des Matériaux Textiles de l'ENSAIT à Roubaix en France.

Je tiens d'abord à remercier les deux organismes le Centre Nationale pour Recherche scientifique et technique (CNRST-Rabat) et Campus France pour le financement de ma mobilité entre le Maroc et la France dans le cadre du partenariat PHC Toubkal.

Je remercie et exprime ma profonde gratitude à Madame Mina OUMAM et Monsieur Pierre OUAGNE d'avoir accepté d'être les rapporteurs de ce manuscrit de thèse et pour les remarques constructives et Messieurs Saïd GMOUH et Michel TOURLONIAS d'avoir accepté d'être les examinateurs de ce manuscrit de thèse.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mes directeurs de thèse, Monsieur Reddad EL MOZNINE, Professeur à la Faculté des Sciences d'El Jadida et Monsieur François BOUSSU, Professeur des Universités à l'ENSAIT, pour m'avoir accordé leur confiance pour me lancer dans cette thèse en cotutelle. Je voudrais leur adresser également mes remerciements pour leur soutien inconditionnel, leur encouragement et leurs précieux conseils pour mener à bien cette thèse. Je tiens également à remercier mes encadrants de thèse, Monsieur Omar CHERKAOUI, Directeur de Recherche & Développement à l'ESITH à Casablanca, Monsieur Damien SOULAT, Professeur des Universités à l'ENSAIT, Monsieur Ahmad-Rashed LABANIEH, Maître de Conférences à l'ENSAIT pour la qualité de leur encadrement.

J'adresse mes vifs remerciements à l'ensemble du personnel des trois laboratoires (doctorant, techniciens, chercheur), laboratoire GEMTEX en France, laboratoire REMTEX au Maroc et laboratoire LPMC, pour m'avoir accueilli et participé à la réalisation de ce travail de thèse.

Je remercie également chaleureusement tous les membres de ma famille : mes parents, ma sœur, mon beau-frère, qui m'ont soutenu et accompagné tout au long de mon parcours éducatif.

Finalement, je tiens à remercier toute personne que je n'ai pas citée ayant contribué de près ou de loin à la réussite de ce travail de thèse.

Liste des abréviations

UD : unidirectionnel

2D : bidirectionnel

3D : tridirectionnel

VER : volume élémentaire représentatif

A/T : interlock d'angle avec liaison des fils de chaîne dans l'épaisseur

A/L : interlock d'angle avec liaison des fils de chaîne couche à couche

O/T : interlock orthogonal avec liaison des fils de chaîne dans l'épaisseur

O/L : interlock orthogonal avec liaison des fils de chaîne couche à couche

TGA : analyse thermogravimétrique

FTIR : spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier

MEB : microscope à balayage électronique

IFBT: impregnated fiber bundle test

Table des matières

Liste des abréviations	3
Liste des figures	9
Liste des tableaux	13
Introduction Générale.....	15
I. ÉTAT DE L'ART SUR LE DEVELOPPEMENT DES MATERIAUX COMPOSITES A BASE DE FIBRES NATURELLES.....	18
I.1. INTRODUCTION	18
I.2. PRESENTATION DES FIBRES NATURELLES.....	19
I.2.1. Classification des fibres naturelles	19
I.2.2. Intérêt écologique et enjeu socio-économique	21
I.2.3. Propriétés physico-chimiques des fibres naturelles.....	24
I.2.3.1. Composition des fibres naturelles.....	24
I.2.3.2. Longueur et Diamètre des fibres naturelles.....	28
I.2.3.3. Densité des fibres naturelles.....	28
I.2.4. Propriétés thermomécaniques des fibres naturelles.....	29
I.2.4.1. Propriétés thermiques	29
I.2.4.2. Propriétés mécaniques	30
I.2.4.2.1. Méthode de caractérisation sur fibres unitaires	30
I.2.4.2.2. Méthode de caractérisation sur les faisceaux ou fils imprégnés.....	31
I.2.5. La fibre de sisal	32
I.2.5.1. Présentation Générale.....	32
I.2.5.2. De la plantation à l'extraction de la fibre	34
I.2.5.3. Domaines d'applications	36
I.3. INTRODUCTION SUR LES STRUCTURES TEXTILES EN FIBRES NATURELLES.....	36
I.3.1. Transformation des fibres naturelles en fils	40
I.3.2. Structures tissées bidirectionnelles.....	42
I.3.3. Structures tissées 3D Interlocks Chaines.....	43
I.3.3.1. Définition des structures tissées 3D interlocks chaines.....	43
I.3.3.2. Classification des structures tissées 3D interlocks chaines	45
I.3.4. Procédé de tissage.....	47
I.3.4.1. Procédé de tissage des structures tissées 2D.....	47
I.3.4.2. Procédé de tissage des structures tissées 3D interlocks chaines.....	49
I.3.5. Approche multi-échelle des structures fibreuses tissées.....	50
I.3.5.1. Approche microscopique (Échelle fibre).....	51
I.3.5.2. Approche mésoscopique (Échelle fil).....	51
I.3.5.3. Approche macroscopique (Échelle tissu)	52
I.3.5.4. Influence du procédé de fabrication sur la performance des fils	53
I.4. REALISATION DES MATERIAUX COMPOSITES A BASE DES FIBRES NATURELLES	55
I.4.1. Mise en œuvre des matériaux composites à base des fibres naturelles	56
I.4.2. Caractérisation des matériaux composites à base des fibres naturelles.....	57
I.4.3. Domaines d'application des matériaux composites à base des fibres naturelles.....	59
I.4.3.1. Application dans le domaine du Transport.....	59

I.4.3.2. Application dans le domaine de l'Ameublement.....	60
I.4.3.3. Application dans le domaine du Loisir.....	60
I.5. CONCLUSION	61
II. ÉTUDE DES STRUCTURES FIBREUSES DE SISAL AUX ECHELLES FIBRE ET FIL..	63
II.1. INTRODUCTION	63
II.2. ÉTUDE DES STRUCTURES FIBREUSES A L'ECHELLE FIBRE (APPROCHE MICROSCOPIQUE) .	63
II.2.1. Fibre de sisal d'origine marocaine.....	63
II.2.2. Propriétés morphologiques de la fibre de sisal.....	64
II.2.2.1. Longueur et diamètre.....	64
II.2.2.1.1. Longueur	64
II.2.2.1.2. Diamètre	65
II.2.2.2. Observation de la surface au microscope à balayage électronique (MEB)	67
II.2.3. Propriétés physiques de la fibre de sisal.....	68
II.2.3.1. Densité.....	68
II.2.3.2. Capacité d'absorption d'eau.....	69
II.2.3.3. Taux de reprise d'humidité.....	71
II.2.3.4. Mouillabilité	73
II.2.4. Propriétés chimiques de la fibre de sisal	74
II.2.4.1. Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (FTIR).....	74
II.2.5. Propriétés thermiques de la fibre de sisal	75
II.2.5.1. Analyse thermogravimétrique (TGA)	76
II.2.6. Propriétés mécaniques de la fibre de sisal.....	77
II.2.6.1. Détermination par l'essai de traction unitaire.....	77
II.2.6.2. Détermination par l'essai du fil de fibres imprégnées	80
II.2.6.2.1. Préparation des éprouvettes	80
II.2.6.2.2. Observation morphologique des éprouvettes	82
II.2.6.2.3. Détermination de la fraction volumique et la porosité des éprouvettes IFBT	83
II.2.6.2.4. Détermination des propriétés des éprouvettes IFBT	84
II.2.6.2.5. Détermination des propriétés des fibres par les différentes lois des mélanges.....	85
II.2.6.2.5.1 Loi des mélanges classique.....	86
II.2.6.2.5.2 Loi des mélanges modifiée incluant le taux de porosités	86
II.2.6.2.5.3 Loi des mélanges modifiée incluant le taux de porosités et le coefficient de torsion en fonction des propriétés des fibres.....	87
II.2.6.2.5.4 Comparaison des modèles des lois des mélanges pour les propriétés des fibres	90
II.2.6.2.5.5 Comparaison des propriétés de traction de la fibre de sisal d'origine marocaine avec la littérature	91
II.3. ÉTUDE DES STRUCTURES FIBREUSES A L'ECHELLE FIL (APPROCHE MESOSCOPIQUE)	92
II.3.1. Fil de sisal d'origine marocaine	92
II.3.2. Propriétés morphologiques du fil de sisal.....	93
II.3.3. Propriétés physiques du fil de sisal.....	95
II.3.3.1. Détermination du titrage du fil	95
II.3.3.2. Détermination de la torsion du fil.....	96
II.3.4. Propriétés mécaniques du fil de sisal.....	98
II.4. INFLUENCE DU PROCEDE DE TISSAGE SUR LES PROPRIETES DES FILS ET DES FIBRES POUR DES STRUCTURES TISSEES (2D ET 3D).....	100
II.4.1. Influence du procédé de tissage sur les propriétés des fils et des fibres pour des	

structures tissées 2D	100
II.4.1.1. Influence du procédé de tissage sur les propriétés des fils pour des structures tissées 2D.....	101
II.4.1.2. Influence du procédé de tissage sur les propriétés des fibres pour des structures tissées 2D.....	104
II.4.2. Influence du procédé de tissage sur les propriétés des fils et des fibres pour des structures tissées 3D	105
II.4.2.1. Influence du procédé de tissage sur les propriétés des fibres pour des structures tissées 3D.....	107
II.4.2.2. Influence du procédé de tissage des structures tissées 3D sur les propriétés des fibres	109
II.5. CONCLUSION	110
III.ÉTUDE DES STRUCTURES FIBREUSES DE SISAL A L'ECHELLE TISSU	113
III.1. INTRODUCTION	113
III.2. ÉTUDE DES STRUCTURES TISSEES BIDIRECTIONNELLES 2D	113
III.2.1. Conception des structures tissées bidirectionnelles 2D.....	113
III.2.2. Procédé de tissage des structures tissées bidirectionnelles 2D.....	115
III.2.2.1. Encantrage et ourdissage des fils de chaîne.....	117
III.2.2.2. Rentrage et piquage des fils de chaîne.....	117
III.2.2.3. Tissage.....	119
III.2.3. Caractérisation des structures tissées bidirectionnelles 2D	120
III.2.3.1. Propriétés structurelles des structures tissées bidirectionnelles 2D.....	120
III.2.3.1.1.Densité chaîne et trame	121
III.2.3.1.2.Embuvage et retrait	122
III.2.3.1.3.Épaisseur	123
III.2.3.1.4.Masse surfacique	124
III.2.3.2. Propriétés mécaniques des structures tissées 2D.....	125
III.2.3.2.1.Propriétés en traction des structures tissées 2D.....	126
III.2.3.2.1.1. Présentation de l'essai de traction.....	126
III.2.3.2.1.2. Caractérisation en traction des structures tissées 2D	126
III.2.3.2.2.Propriétés en flexion des structures tissées 2D.....	130
III.2.3.2.2.1. Présentation de l'essai de flexion.....	130
III.2.3.2.2.2. Caractérisation en flexion des structures tissées 2D	131
III.2.3.2.3.Propriétés en compaction des structures tissées 2D	133
III.2.3.2.3.1. Présentation de l'essai de compaction.....	133
III.2.3.2.3.2. Caractérisation en compaction des structures tissées 2D.....	133
III.2.3.2.4.Analyse des propriétés mécaniques des tissus 2D.....	134
III.3. ÉTUDE DES STRUCTURES TISSEES 3D INTERLOCKS CHAINES	134
III.3.1. Conception des structures tissées 3D interlocks chaînes.....	134
III.3.2. Procédé de tissage des structures tissées 3D interlocks chaînes.....	136
III.3.3. Caractérisation des structures tissées 3D interlocks chaînes.....	137
III.3.3.1. Propriétés structurelles des structures tissées 3D interlocks chaînes.....	138
III.3.3.1.1.Densité chaîne et trame	138
III.3.3.1.2.Embuvage et retrait	139
III.3.3.1.3.Épaisseur et masse surfacique	141
III.3.3.1.4.Analyse des propriétés structurelles des tissus 3D interlocks chaînes	142
III.3.3.2.Propriétés mécaniques des structures tissées 3D interlocks chaînes	142

III.3.3.2.1. Propriétés en traction des structures tissées 3D interlocks chaines	142
III.3.3.2.1.1. Présentation de l'essai de traction	142
III.3.3.2.1.2. Caractérisation en traction des structures tissées 3D interlocks chaines..	
.....	143
III.3.3.2.2. Propriétés en flexion des structures tissées 3D interlocks chaines	147
III.3.3.2.2.1. Présentation de l'essai de flexion	147
III.3.3.2.2.2. Caractérisation en flexion des structures tissées 3D interlocks chaines..	
.....	147
III.3.3.2.3. Propriétés en compaction des structures tissées 3D interlocks chaines	148
III.3.3.2.3.1. Présentation de l'essai de compaction	148
III.3.3.2.3.2. Caractérisation du comportement en compaction	148
III.3.3.2.4. Analyse des propriétés mécaniques des tissus 3D interlocks chaines	149
III.4. CONCLUSION	149
IV. ÉLABORATION ET CARACTERISATION DES MATERIAUX COMPOSITES A BASE	
DES FIBRES DE SISAL.....	152
IV.1. INTRODUCTION	152
IV.2. MISE EN ŒUVRE DES MATERIAUX COMPOSITES A BASE DES STRUCTURES TISSEES	
BIDIRECTIONNELLES 2D	152
IV.2.1. Matériau utilisé	152
IV.2.2. Procédé d'élaboration (Infusion sous vide)	153
IV.2.3. Caractérisation des matériaux composites à base des structures tissées	
bidirectionnelles 2D	154
IV.2.3.1. Propriétés physiques	155
IV.2.3.1.1. Épaisseur	155
IV.2.3.1.2. Fraction volumique des fibres et de porosités	156
IV.2.3.1.3. Densité	158
IV.2.3.1.4. Taux de reprise d'humidité	158
IV.2.3.1.5. Conclusion	161
IV.2.3.2. Propriétés mécaniques	161
IV.2.3.2.1. Propriétés mécaniques en traction	162
IV.2.3.2.1.1. Présentation de l'essai de traction	162
IV.2.3.2.1.2. Caractérisation en traction	162
IV.2.3.2.2. Propriétés mécaniques en flexion	168
IV.2.3.2.2.1. Présentation de l'essai de flexion	168
IV.2.3.2.2.2. Caractérisation en flexion	169
IV.2.3.2.3. Propriétés à l'impact Charpy	175
IV.2.3.2.3.1. Présentation de l'essai d'impact Charpy	175
IV.2.3.2.3.2. Caractérisation à l'impact Charpy	176
IV.2.3.2.4. Conclusion	179
IV.3. MISE EN ŒUVRE DES MATERIAUX COMPOSITES A BASE DES STRUCTURES TISSEES 3D	
INTERLOCKS CHAINES	179
IV.3.1. Matériau utilisé	179
IV.3.2. Procédé d'élaboration par Infusion sous vide	180
IV.3.3. Caractérisation des matériaux composites à base des structures tissées 3D interlocks	
chaines	180
IV.3.3.1. Propriétés physiques	181
IV.3.3.1.1. Épaisseur	181

IV.3.3.1.2.Fractions volumiques de fibres et de porosités	181
IV.3.3.1.3.Densité.....	182
IV.3.3.1.4.Taux de reprise d’humidité	183
IV.3.3.1.5.Conclusion.....	185
IV.3.3.2. Propriétés mécaniques	185
IV.3.3.2.1.Propriétés mécaniques en traction.....	185
IV.3.3.2.1.1. Présentation de l’essai de traction	185
IV.3.3.2.1.2. Caractérisation en traction.....	185
IV.3.3.2.2.Propriétés mécaniques en flexion.....	188
IV.3.3.2.2.1. Présentation de l’essai de flexion	188
IV.3.3.2.2.2. Caractérisation en flexion.....	188
IV.3.3.2.3.Propriétés d’impact Charpy.....	189
IV.3.3.2.3.1. Présentation de l’essai d’impact Charpy	189
IV.3.3.2.3.2. Caractérisation à l’impact Charpy	190
IV.3.3.2.4.Conclusion.....	190
IV.4. CONCLUSION	191
CONCLUSION GENERALE.....	194
PERSPECTIVES.....	198
BIBLIOGRAPHIE	200
ANNEXES	213
ANNEXE A: PRODUCTIONS SCIENTIFIQUES	214
ANNEXE B: FICHES TECHNIQUES DES STRUCTURES TISSEES 2D EN FIL DE SISAL	217
ANNEXE C: FICHES TECHNIQUES DES STRUCTURES TISSEES 3D INTERLOCKS	
CHAINES EN FIL DE SISAL	230

Liste des figures

Figure I.1 :Classification des fibres naturelles selon leurs origines [19].....	20
Figure I.2 :Production mondiale des fibres végétales[21].....	21
Figure I.3 : Comparaison des propriétés spécifiques des fibres végétales et des fibres de verre [22]...	21
Figure I.4 : Analyse du cycle de vie de la fibre de lin (hackled flax fibre) et de la fibre de verre (glass fibre) [28]	23
Figure I.5 : Comparatif du prix de vente par tonne de la fibre de verre et des fibres naturelles[31].....	24
Figure I.6 : Représentation schématique d'une cellule de la fibre végétale [37],[38]	25
Figure I.7 : Positionnement des fibrilles de cellulose dans la paroi secondaire de la fibre végétale [39]	25
Figure I.8 : Structure moléculaire de la cellulose [41]	26
Figure I.9 : Structure moléculaire d'un modèle de la lignine [42]	26
Figure I.10 : Structure chimique d'un type d'hémicellulose [43].....	27
Figure I.11 : Structure moléculaire des pectines [43].....	27
Figure I.12 : Classification Botanique de la plante d'Agave Sisalana	32
Figure I.13 : Province de Taounate (Nord Du Maroc)[71].....	33
Figure I.14 : Coupe Transversale de la feuille de la plante Agave Sisalana a)-Détail des faisceaux cribro-vasculaires des fibres mécaniques b) Détail des faisceaux cribro-vasculaires des fibres rubanées [72]	34
Figure I.15 : Récolte des feuilles de la plante d'Agave Sisalana [73]	35
Figure I.16 : Procédé d'extraction mécanique des fibres de sisal : a) décortiqueuse mécanique, b) fibres de sisal extraites [76].....	35
Figure I.17 : Classification des structures fibreuses [79]	37
Figure I.18 : Classification Complémentaire proposée par Fukuta [80]	37
Figure I.19 : Structure Fibreuse Unidirectionnelle [78]	38
Figure I.20 : Classification des Structures Textiles Bidirectionnelles : A. Structure Tissée, B. Structure Tressée et C. Structure Tricotée [81].....	38
Figure I.21 : Classification des Structures Textiles Tri-directionnelles :A. Structure Tissée , B. Structure Tressée et C. Structure Tricotée [81].....	39
Figure I.22 : Processus Générale de Filature [96]	41
Figure I.23 : A. Fil non tordu et B. Fil tordu [83]	41
Figure I.24 : Impact de la torsion sur la résistance et la rupture des fils [99].....	42
Figure I.25 : Armures fondamentales des structures tissées 2D: A. Toile, B. Sergé et C. Satin	43
Figure I.26 : Représentation géométrique des structures tissées 3D interlocks chaines [103].....	43
Figure I.27 : Représentation schématique par une coupe transversale des fils de trame d'une structure tissée 3D interlock chaine [103].....	44
Figure I.28 : Classification des structures tissées 3D interlocks chaines [107].....	46
Figure I.29 : Procédé général de tissage	47
Figure I.30 : Représentation d'un cantre de bobines de fils de chaine.....	48
Figure I.31 : Principe de l'ourdissage direct [110]	48
Figure I.32 : Principe de L'ourdissage indirect [110]	48
Figure I.33 : Principe de base du rentrage [110]	49
Figure I.34 : Schéma descriptif du procédé de tissage des structures tissées 2D [111]	49
Figure I.35 : Schéma descriptif du procédé de tissage des structures tissées 3D interlocks chaines [115]	50
Figure I.36 : Représentation Multi-échelle des structures fibreuses tissées	51

Figure I.37 : Exemples de volume élémentaire représentatif : A. Exemple de VER des structures tissées 2D, B. Exemple de VER des structures tissées 3D	52
Figure I.38 : Dégradation des fils durant le tissage des structures 3D interlocks chaines : A. Dégradation des fils de lin, B. Dégradation des fils de kevlar [74],[96].....	55
Figure I.39 : Composition des matériaux composites	55
Figure I.40 : Classification des procédés de mise en œuvre des matériaux composites [122].....	56
Figure I.41 : Exemple d'application des matériaux composites à base des fibres naturelles dans l'automobile [138]	60
Figure I.42 : Exemples d'ameublement à base des matériaux composites [139].....	60
Figure I.43 : Exemple d'instrument de musique à base des matériaux composites [139]	61
Figure I.44 : Planche de surf à base des matériaux composites [139].....	61
Figure II.1 : Fibre de sisal	64
Figure II.2: Maillemètre pour la mesure de la longueur de la fibre de sisal.....	64
Figure II.3: Distribution de la longueur de la fibre de sisal d'origine marocaine	65
Figure II.4: Mesure du diamètre par un microscope optique : A)-Observation optique de la fibre de sisal , B)-Microscope optique Olympus BX15 , C)-Échantillon de la fibre de sisal observé au microscope	66
Figure II.5: Distribution du diamètre de la fibre de sisal d'origine marocaine	67
Figure II.6: A) -Observation en coupe longitudinale au MEB de la surface de la fibre de sisal , B)- son agrandissement ($\times 700$)	67
Figure II.7: Évolution de l'absorption de l'eau par la fibre de sisal.....	70
Figure II.8: Évolution de la reprise en humidité par la fibre de sisal	72
Figure II.9: Spectre FTIR de la fibre de sisal	75
Figure II.10: Analyse thermogravimétrique de la fibre de sisal.....	77
Figure II.11: Machine de charge universelle Zwick Z005	78
Figure II.12: Courbe « contrainte-déformation » de la fibre de sisal	79
Figure II.13:Préparation des éprouvettes IFBT, A)- Moule IFBT , B)-Préparation de la première éprouvette IFBT	81
Figure II.14: Moule IFBT placé dans la presse chauffante	82
Figure II.15: A) -Observation de la coupe transversale d'une éprouvette IFBT, B) - son agrandissement ($\times 10$).....	83
Figure II.16: courbe de traction « contrainte – déformation » d'une éprouvette IFBT.....	85
Figure II.17: Facteur de longueur des fibres en fonction du rapport d'aspect des fibres	88
Figure II.18: Modules d'élasticité de la fibre de sisal calculés par les deux méthodes.....	91
Figure II.19: Fil de sisal	93
Figure II.20: Image microscopique du fil de sisal.....	94
Figure II.21: Mesure du diamètre du fil de sisal	95
Figure II.22: Fil de sisal avec la mesure de l'angle de torsion à l'aide du logiciel imageJ [142].....	98
Figure II.23: Essai en traction du fil de sisal à l'aide du banc de traction MTS SYSTEM	98
Figure II.24: Courbe « Effort - Déformation » du fil de sisal	99
Figure II.25: Titre des fils de sisal lors du tissage des structures fibreuses 2D.....	102
Figure II.26: Ténacité des fils de sisal après le tissage des structures tissées 2D.....	103
Figure II.27: Déformation à rupture des fils de sisal après le tissage des structures tissées 2D.....	103
Figure II.28: Modules d'élasticité des fibres avant et après tissage des structures fibreuses 2D.....	105
Figure II.29: Titre des fils de sisal lors du tissage des structures tissées 3D.....	107
Figure II.30: Ténacité des fils de sisal après le tissage des structures tissées 3D.....	108
Figure II.31: Déformation à rupture des fils de sisal après le tissage des structures tissées 3D.....	109
Figure II.32: Modules d'élasticité des fibres de sisal après le tissage des structures fibreuses 3D.....	110
Figure III.1: A. Encantrage, B. Ourdissage Direct des fils de sisal et C. Répartition des fils par le peigne	

miseur.....	117
Figure III.2: Rentrage des fils de chaîne de sisal.....	118
Figure III.3: Piquage au peigne des fils de chaîne de sisal.....	119
Figure III.4: Machine à tisser ARM d'échantillonnage.....	120
Figure III.5: Vues d'endroit des structures tissées 2D produites.....	120
Figure III.6: Embuvage des fils de sisal au sein des structures tissées 2D.....	123
Figure III.7: Retrait des fils de sisal au sein des structures tissées 2D.....	123
Figure III.8: Épaisseur des structures tissées 2D à base de fils de sisal.....	124
Figure III.9: Masse surfacique des structures tissées 2D à base de fils de sisal.....	125
Figure III.10: Banc de traction INSTRON 5890 250 KN.....	126
Figure III.11: Courbe « Effort -Déformation » des structures tissées 2D à base de fils de sisal.....	128
Figure III.12: A. Effort maximal des structures tissées 2D à base de fils de sisal dans la direction chaîne et B. Effort maximal des structures tissées 2D à base de fils de sisal dans la direction trame.....	129
Figure III.13: A. Déformation à rupture et valeurs d'embuvage des structures tissées 2D à base de fils de sisal dans la direction chaîne et B. Déformation à rupture et valeurs du retrait des structures tissées 2D à base de fils de sisal dans la direction trame.....	130
Figure III.14: Schéma du test cantilever [192].....	131
Figure III.15: A. Coefficient de rigidité en flexion et densité des fils des structures tissées 2D à base de fils de sisal dans la direction chaîne et B. Coefficient de rigidité en flexion et densité des fils des structures tissées 2D à base de fils de sisal dans la direction trame.....	132
Figure III.16: Comportement en compaction des structures tissées 2D à base de fils de sisal.....	134
Figure III.17: Procédé de tissage des structures tissées 3D interlocks chaînes.....	137
Figure III.18: Vue en face avant des structures tissées 3D interlocks chaînes produites.....	138
Figure III.19: Densité des fils des structures tissées 3D interlocks chaînes à base de fils de sisal.....	139
Figure III.20: Embuvage des fils de chaîne au sein des structures tissées 3D interlocks chaînes à base de fils de sisal.....	140
Figure III.21: Retrait des fils de trame au sein des structures tissées 3D interlocks chaîne à base de fils de sisal.....	141
Figure III.22: Masse surfacique et épaisseur des structures tissées 3D interlocks chaînes à base de fils de sisal.....	142
Figure III.23: Courbe « Effort maximal – déformation » des structures tissées 3D interlocks chaînes à base de fils de sisal.....	144
Figure III.24: Effort maximal des structures tissées 3D interlocks chaînes à base de fils de sisal.....	145
Figure III.25: Déformation à la rupture des structures tissées 3D interlocks chaînes à base de fils de sisal dans la direction chaîne.....	146
Figure III.26: Déformation à la rupture des structures tissées 3D interlocks chaînes à base de fils dans la direction trame.....	146
Figure III.27: Coefficient de rigidité en flexion des structures tissées 3D interlocks chaînes à base de fils de sisal.....	147
Figure III.28 : Comportement en compaction des structures tissées 3D interlocks chaînes.....	148
Figure IV.1: Six structures tissées 2D utilisées pour le renforcement des matériaux composites.....	153
Figure IV.2: Schéma du protocole d'infusion sous vide utilisé.....	154
Figure IV.3: Montage utilisé pour l'élaboration des matériaux composites.....	154
Figure IV.4: Epaisseur des plaques composites à base des structures tissées 2D, la désignation des plaques composites est donnée dans le Tableau 4-1.....	156
Figure IV.5: Courbes « teneur en humidité – temps » des plaques composites à base d'un seul pli de tissu 2D.....	160
Figure IV.6: Courbes « teneur en humidité – temps » des plaques composites à base de deux plis de	

tissus 2D	160
Figure IV.7: Essai de traction sur une plaque composites sur le banc INSTRON 5890 250 KN	162
Figure IV.8: Contrainte à rupture en traction des composites à base d'un seul pli de tissus 2D	163
Figure IV.9: Contrainte à rupture en traction des composites à base de deux plis de tissus 2D	163
Figure IV.10: Module de traction des plaques composites à base d'un seul pli de tissu 2D	164
Figure IV.11: Module de traction des plaques composites à base de deux plis de tissus 2D	165
Figure IV.12: Déformation à rupture en traction des composites à base d'un seul pli de tissus 2D....	166
Figure IV.13: Déformation à rupture en traction des composites à base de deux plis de tissus 2D....	166
Figure IV.14: test de l'éprouvette par le banc de flexion INSTRON 5890 2KN.....	169
Figure IV.15: Contrainte à rupture en flexion des plaques composites à base d'un seul pli de tissus 2D	170
Figure IV.16: Contrainte à rupture en flexion des plaques composites à base de deux plis de tissus 2D	171
Figure IV.17: Module de flexion des plaques composites à base d'un seul pli de tissus 2D.....	171
Figure IV.18: Module de flexion des plaques composites à base de deux plis de tissus 2D.....	172
Figure IV.19: Déformation à rupture en flexion des plaques composites à base d'un seul pli de tissus 2D	172
Figure IV.20 : Déformation à rupture en flexion des plaques composites à base de deux plis de tissus 2D	173
Figure IV.21: Mouton-pendule motorisé INSTRON CEAST 9050.....	175
Figure IV.22: L'énergie absorbée à rupture des plaques composites à base d'un seul pli de tissus 2D	176
Figure IV.23: L'énergie absorbée à rupture des plaques composites à base de deux plis de tissus 2D	177
Figure IV.24: Structures tissées 3D interlocks chaines utilisées pour le renforcement des matériaux composites	179
Figure IV.25: Montage utilisé du procédé d'infusion sous vide des matériaux composites à base des structures tissées 3D interlocks chaines	180
Figure IV.26: Épaisseur des plaques composites à base des structures tissées 3D interlocks chaines	181
Figure IV.27: Taux de reprise d'humidité des plaques composites à base des structures tissées 3D interlocks chaines	184
Figure IV.28: Contrainte à rupture en traction des plaques composites à base des structures tissées 3D interlocks chaines	186
Figure IV.29: Module de traction des plaques composites à base des structures tissées 3D interlocks chaines.....	187
Figure IV.30: Déformation à rupture en traction des plaques composites à base des structures tissées 3D interlocks chaines	187
Figure IV.31: Contrainte à rupture en flexion des plaques composites à base des structures tissées 3D interlocks chaines	188
Figure IV.32: Module de flexion des plaques composites à base des structures tissées 3D interlocks chaines.....	189
Figure IV.33: Déformation à rupture en flexion des plaques composites à base des structures tissées 3D interlocks chaines	189
Figure IV.34: Énergie absorbée à rupture des plaques composites à base des structures tissées 3D interlocks chaines	190

Liste des tableaux

Tableau I-1 : Comparatif de l'impact environnemental de la production de la fibre de chanvre et de verre[27].....	22
Tableau I-2 : Composition Chimique des fibres végétales [44],[45].....	27
Tableau I-3 : Propriétés Mécaniques des fibres naturelles et synthétiques [12], [62]–[64]	31
Tableau II-1 : Longueur de la fibre de sisal selon l'origine	65
Tableau II-2: Diamètre de la fibre de sisal selon l'origine	66
Tableau II-3: Densité de la fibre de sisal selon l'origine.....	69
Tableau II-4: Coefficient de diffusion et de perméabilité des fibres végétales dans l'eau distillée.....	71
Tableau II-5: Taux de reprise en humidité et les paramètres de diffusion des fibres végétales	73
Tableau II-6 : Angle de contact des fibres végétales.....	74
Tableau II-7: Propriétés mécaniques de la fibre de sisal selon l'origine.....	80
Tableau II-8: Fraction volumique des fils tordus de la fibre de sisal, de la matrice et de la porosité des éprouvettes IFBT	84
Tableau II-9: Modules d'élasticité des éprouvettes IFBT	85
Tableau II-10: Les modules d'élasticité de la fibre de sisal selon la loi des mélanges classique	86
Tableau II-11: Les modules d'élasticité de la fibre de sisal selon la loi des mélanges incluant le taux de porosité.....	87
Tableau II-12 : Les modules d'élasticité de la fibre sisal selon la loi des mélanges incluant le taux de porosités et le coefficient de torsion en fonction des propriétés des fils	89
Tableau II-13 : Les modules d'élasticité de la fibre sisal selon la loi des mélanges incluant le taux de porosités et le coefficient de torsion en fonction des propriétés des fibres	90
Tableau II-14: Le module d'élasticité de la fibre de sisal selon l'origine et la méthode de caractérisation	92
Tableau II-15: le diamètre du fil de sisal selon l'origine.....	94
Tableau II-16: le titre du fil de sisal selon l'origine	95
Tableau II-17: Angle de torsion du fil de sisal[142]	98
Tableau II-18: La ténacité du fil de sisal selon l'origine.....	100
Tableau II-19: Architectures tissées 2D utilisées	101
Tableau II-20: Composition des éprouvettes IFBT conçues à partir des fils avant et après tissage....	104
Tableau II-21: Coupe transversale et représentation 3D des structures fibreuses 3D	106
Tableau II-22: Composition des éprouvettes IFBT conçues à partir de fils avant et après tissage des structures 3D Interlock chaîne.....	109
Tableau III-1: Représentation 2D et 3D des structures fibreuses tissées 2D.....	114
Tableau III-2: Densité chaîne et trame des structures tissées 2D à base de fils de sisal	121
Tableau III-3: Représentation 3D et coupe transversale des structures tissées 3D interlocks chaînes à base de fils de sisal	135
Tableau IV-1 : Désignation des plaques composites à base des structures tissées 2D.....	155
Tableau IV-2: Fraction volumique des fibres, de la résine et de la porosité des plaques composites à base des structures tissées 2D.....	157
Tableau IV-3: La densité des plaques composites réalisées à base des structures tissées 2D.....	158
Tableau IV-4: Paramètres de diffusion de l'absorption de l'humidité des plaques composites à base des structures tissées 2D	161
Tableau IV-5: Comparaison des propriétés de traction des plaques composites à base d'un seul pli de tissu 2D en fibre de sisal avec celles des plaques composites à base de tissus 2D en fibres naturelles	

.....	167
Tableau IV-6: Comparaison des propriétés de traction des plaques composites à base de deux plis de tissus 2D en fibre de sisal avec celles des plaques composites à base de tissus 2D en fibres naturelles	168
.....	168
Tableau IV-7: Comparaison des propriétés de flexion des plaques composites à base d'un seul pli de tissus 2D en fibre de sisal avec celles des plaques composites à base de tissus 2D en fibres naturelles	174
.....	174
Tableau IV-8: Comparaison des propriétés de flexion des plaques composites à base de deux plis de tissus 2D en fibre de sisal avec celles des plaques composites à base de tissus 2D en fibres naturelles	178
.....	178
Tableau IV-9: Comparaison des propriétés d'impact Charpy des plaques composites à base d'un seul pli de tissus 2D en fibre de sisal avec celles des matériaux composites à base d'un seul pli de tissus 2D en fibres naturelles	178
.....	178
Tableau IV-10: Comparaison des propriétés d'impact Charpy des plaques composites à base de deux plis de tissus 2D en fibre de sisal avec celles des matériaux composites à base de deux et trois plis de tissus 2D en fibres naturelles	180
.....	180
Tableau IV-11: Désignation des plaques composites à base des structures tissées 3D interlocks chaines	182
.....	182
Tableau IV-12: Fractions volumiques des fibres et de porosités des matériaux composites à base des structures tissées 3D interlocks chaines	183
.....	183
Tableau IV-13: Densité des plaques composites à base des structures tissées 3D interlocks chaines	184
.....	184
Tableau IV-14: Coefficient Paramètres de diffusion de l'absorption de l'humidité des plaques composites	184
.....	184

Introduction Générale

À l'état naturel, les structures composites, telles que les os ou le bois sont des matériaux existant depuis des siècles, tandis que les matériaux composites de synthèse sont relativement récents, puisque leur industrialisation a démarré depuis le XXème siècle [1]. Les matériaux composites ont le potentiel de remplacer les matériaux métalliques en assurant un gain en poids de 60 à 80 % pour des performances mécaniques spécifiques et thermique identiques, et notamment dans les industries aéronautiques et automobiles [2], [3].

La performance mécanique des matériaux composites dépend essentiellement des propriétés mécaniques du renfort. Le renfort se présente sous différentes formes (tissée, tricotée, non tissée...). Les renforts tissés représentent l'architecture la plus utilisée dans les industries aéronautique et automobile. La dimension du renfort tissé est choisie en fonction de la performance désirée [1]. Les préformes tissées bidirectionnelles sont développées pour un transfert de charge dans les deux directions du plan. En revanche, les préformes tissées tridirectionnelles (avec des renforts dans l'épaisseur) sont utilisées pour garantir une résistance au délaminage dans l'industrie aéronautique [4]. La compréhension du comportement des renforts tissés nécessite une approche multi-échelle, depuis la fibre en passant par le fil jusqu'à la structure finale [5].

Les matériaux composites conventionnels à partir de renforts tissés sont généralement développés à base des ressources fossiles. L'impact environnemental de ces matériaux conventionnels a conduit à favoriser l'exploitation des ressources naturelles pour le développement des matériaux composites respectueux de l'environnement. De ce fait, de nouvelles réglementations industrielles ont conduit à l'application de stratégies de développement durable dans l'industrie des matériaux composites [6]. Les fibres issues de ressources naturelles semblent être l'une des solutions matériaux les appropriées pour le remplacement des fibres synthétiques utilisées en tant que renfort fibreux de matériaux composites.

La variété et la disponibilité des fibres naturelles à l'échelle de la planète permettent d'offrir une exploitation raisonnable de ces ressources naturelles. Les ressources naturelles en Afrique du nord (plus précisément le Maroc) sont rarement utilisées dans l'industrie des matériaux composites, et souvent exploitées dans l'artisanat et la médecine traditionnelle. Les politiques

sectorielles de la stratégie de croissance pour le Maroc sont désormais dominées par la question du développement durable, ce qui a induit une très forte pression pour l'investissement dans les technologies à bas coûts, sobres en matières premières et peu polluantes. Cela est devenu un des enjeux majeurs pour favoriser de nouveaux processus de croissance économique et adapter le tissu socio-économique du Maroc dans les mutations en cours. Il s'agit de développer de nouveaux produits et modes de production industrielle permettant d'intégrer l'économie marocaine dans l'économie mondiale, qui s'oriente de plus en plus vers une économie issue du savoir en tant que capital intellectuel [7].

D'un point de vue scientifique, quelques études ont été menées sur le développement de matériaux composites à base de fibres naturelles marocaines, telles que les fibres de palmier ou les fibres issues de pomme de pin [8]–[10]. En revanche, le potentiel de la fibre de sisal extraite de sa plantation située au Maroc ne semble pas avoir été l'objet d'une investigation particulière et notamment au sein de renfort fibreux multicouches et épais en comparaison avec la fibre extraite de sa plantation située en Inde [11] et en Algérie [12].

Ces travaux se focalisent sur le développement de renforts tissés bidirectionnels et tri-directionnels en fibre de sisal d'origine marocaine en optant pour une approche multi échelle d'analyse des propriétés (fibre, fil, tissu) et sur la mise en œuvre de ces renforts tissés pour la réalisation des matériaux composites. Ces travaux ont été effectués au sein de trois laboratoires : les caractérisations de la fibre et du fil de sisal ont été accomplies au Laboratoire de Recherche sur les Matériaux Textiles (REMTEX) à l'ESITH de Casablanca et au Laboratoire de la Physique de la Matière Condensée (LPMC) de la Faculté des sciences d'EL JADIDA. La production et la caractérisation des renforts tissés et des matériaux composites ont été effectuées au sein du Laboratoire de Génie et Matériaux Textiles (GEMTEX) à l'ENSAIT de Roubaix. Ces travaux de thèse s'inscrivent dans le cadre du partenariat franco-marocain Hubert Curien (**PHC Toubkal**).

Le manuscrit est divisé en quatre chapitres. Le premier chapitre concerne l'État de l'art sur le développement des matériaux composites à base des fibres naturelles et sur la fibre de sisal , notamment celle d'origine marocaine, en décrivant les différentes étapes de la récolte jusqu'à l'exploitation finale. Ensuite, le procédé de transformation de la fibre en fil est exposé pour la mise en forme des renforts. Puis, les différentes formes de renforts tissés à base de fibres naturelles sont présentées en s'attardant sur les renforts tissés 2D et les renforts tissés 3D interlocks chaînes. Après cette présentation des renforts, l'analyse du comportement des

renforts est abordée. Ensuite, l'influence du procédé de fabrication sur la performance de la fibre et du fil au sein des renforts tissés est décrite par le biais de leurs propriétés mécaniques. Enfin, les procédés de fabrication des matériaux composites sont présentés, ainsi que les méthodes de caractérisation et les domaines d'application.

Le deuxième chapitre se focalise sur l'étude des structures tissées aux échelles fibres et fils. Les différentes propriétés (morphologiques, chimiques, thermiques et mécaniques) de la fibre de sisal extraite du fil sont identifiées pour évaluer la performance de la fibre de sisal d'origine marocaine par rapport aux autres fibres naturelles. Ensuite, les propriétés morphologiques, physiques et mécaniques du fil de sisal sont identifiées et analysées. Enfin, l'impact du procédé de tissage des fils de sisal sur leurs propriétés est étudié aux échelles des fibres et fils.

Le troisième chapitre est dédié à la mise en œuvre et la caractérisation des structures tissées bidirectionnelles et tridimensionnelles à base de fils de sisal. Les architectures conçues des structures tissées bidirectionnelles 2D sont présentées, ainsi que les différentes étapes du procédé de tissage. Ensuite, les différentes propriétés textiles et mécaniques des tissées bidirectionnelles 2D sont identifiées. De l'étape de conception en passant par la fabrication jusqu'à la caractérisation des structures tissées 3D interlocks chaîne, la même démarche a été appliquée que celle utilisée pour l'analyse des structures fibreuses tissées bidirectionnelles 2D.

Le quatrième chapitre porte sur la mise en œuvre des matériaux composites renforcés par les structures tissées 2D et 3D interlocks chaînes à base de fils de sisal. La mise en œuvre des matériaux composites à base des structures tissées bidirectionnelles 2D est présentée en décrivant le procédé de fabrication. Puis, les propriétés physiques et mécaniques des matériaux composites réalisés sont analysées et comparées avec les propriétés des matériaux composites issues de la littérature. Ensuite, la mise en œuvre et la caractérisation des matériaux composites à base des structures 3D interlocks chaînes sont présentées en décrivant le procédé de fabrication, en identifiant les propriétés physiques et mécaniques des matériaux composites réalisés et en positionnant la performance des matériaux composites réalisés par rapport à celles des matériaux composites issus de la littérature.

I. État de l'art sur le développement des matériaux composites à base de fibres naturelles

I.1. Introduction

L'importance des matériaux composites dans l'industrie augmente de jour en jour. Les matériaux composites résultent d'un assemblage de deux matériaux non miscibles pour apporter des propriétés spécifiques. Les composants des matériaux composites comportent deux phases nommées renfort et matrice. Le renfort assure la résistance aux sollicitations mécaniques, tandis que la matrice permet de transférer les sollicitations mécaniques au renfort. Les matériaux composites conventionnels sont basés sur des matériaux issus de ressources fossiles (fibre de verre, fibre de carbone...). Les nouvelles réglementations industrielles à appliquer, dans le cadre de la stratégie du développement durable, favorisent l'exploitation des ressources renouvelables pour la production des biomatériaux [13]. Ces enjeux environnementaux permettent d'élargir le domaine d'utilisation des fibres naturelles et plus précisément dans le renforcement des matériaux composites.

Les fibres naturelles représentent une solution attractive pour le renforcement des matériaux composites au niveau de la densité et du coût de fabrication de ces matériaux [14]. En revanche, la structure chimique de ces fibres peut poser des problèmes d'absorption de l'humidité et de la dégradation thermique au-delà de 200°C [15]. L'étude approfondie du comportement mécanique, physique et thermique des fibres naturelles avant de procéder à la fabrication des renforts est une étape primordiale pour mieux comprendre les propriétés spécifiques des renforts.

Le renfort se présente sous différentes formes (tissé, tressé...) afin de répondre aux besoins industriels. Le tissage reste parmi les méthodes de fabrication la plus répandue pour la production des renforts [16]. Les tissus bidimensionnels et tridimensionnels dépendent prioritairement des propriétés du fil et de la fibre. Dans ce cas, l'aspect multi-échelle dans l'étude des renforts à l'état sec est un point essentiel pour comprendre leur comportement

I.État de l’art sur le développement des matériaux composites à base de fibres naturelles

mécanique et leur potentiel de renforcement des matériaux composites.

Ce premier chapitre porte sur les généralités du développement des matériaux composites à base de fibres naturelles. Dans la première partie, les fibres naturelles seront décrites de manière générale, puis la fibre de sisal d’origine marocaine sera présentée plus précisément depuis la récolte jusqu’à l’exploitation finale. Dans la deuxième partie, les différentes formes de renforts tissés à base de fibres naturelles seront identifiées selon la dimension finale du renfort. Puis, les renforts tissés 3D interlocks chaines seront définis en identifiant le positionnement de chaque type de fils au sein de ces renforts selon la classification des structures tissées 3D interlocks chaines et en décrivant leur procédé de fabrication. Après la présentation des différents renforts tissés, le comportement des renforts sera étudié par une approche multi-échelle (microscopique, mésoscopique et macroscopique). Ensuite, l’influence du procédé de fabrication sur la performance de la fibre et du fil des renforts tissés sera analysée par le biais de leurs propriétés mécaniques. Dans la dernière partie, les matériaux composites à base de fibres naturelles seront abordés en décrivant le procédé de fabrication, la caractérisation des propriétés et les domaines d’application.

I.2. Présentation des fibres naturelles

Les fibres naturelles sont des matériaux biodégradables et renouvelables comparativement aux fibres synthétiques [4],[5]. Leur diversité, leur production raisonnée et leur fort impact sociétal à l’échelle mondiale permettent de favoriser leur utilisation dans l’industrie. Le renforcement des matériaux composites est un domaine attractif pour l’exploitation des fibres naturelles. Par conséquent, l’alternative naturelle des renforts synthétiques a contribué en premier à étudier la classification des fibres naturelles afin d’identifier le type de fibre le plus approprié dans le domaine des matériaux composites.

I.2.1. Classification des fibres naturelles

Généralement, les fibres naturelles sont divisées en trois groupes selon leurs origines (Figure I.1).

- Le premier groupe comporte les fibres d’origine végétale. Les fibres végétales se regroupent en fonction de la zone de prélèvement de la fibre au sein de la plante. Elles

I.État de l’art sur le développement des matériaux composites à base de fibres naturelles

peuvent être extraites de la tige (lin...), de la feuille (sisal...) ou des graines (coton...) [19]. Elles sont disponibles dans les différents continents comme l’illustre la Figure I.2. La structure lignocellulosique des fibres permet de concurrencer les fibres synthétiques en termes de résistance mécanique. Les propriétés des fibres végétales ont été analysées par rapport aux propriétés des fibres de verre par D. U. Shah [20]. La Figure I.3 démontre le potentiel et la performance des fibres végétales dans le remplacement des fibres de verre. La teneur en cellulose des fibres végétales est un facteur critique dans la résistance aux sollicitations mécaniques.

- Le deuxième groupe comprend les fibres d’origine animale. Les fibres d’origine animale proviennent des poils (toison issue des mammifères) et des sécrétions (soie...). Les fibres issues de la toison offrent une excellente isolation thermique et un comportement élastique suffisant pour permettre leur utilisation dans les différentes technologies textiles. Tandis que les fibres issues des sécrétions ont une mauvaise conductivité électrique [19].
- Le troisième groupe englobe les fibres d’origine minérale. Les fibres minérales sont issues de roches (amiante, basalte, ...). Elles sont utilisées avec précaution à cause de leur impact sur l’appareil respiratoire de l’homme.

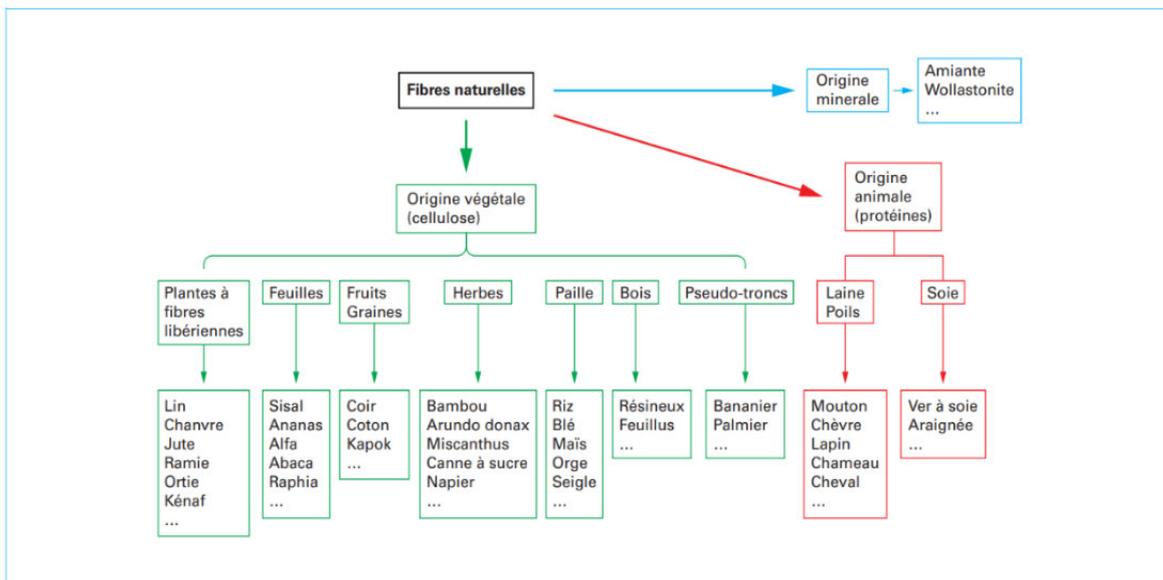


Figure I.1 :Classification des fibres naturelles selon leurs origines [19]

I.État de l’art sur le développement des matériaux composites à base de fibres naturelles

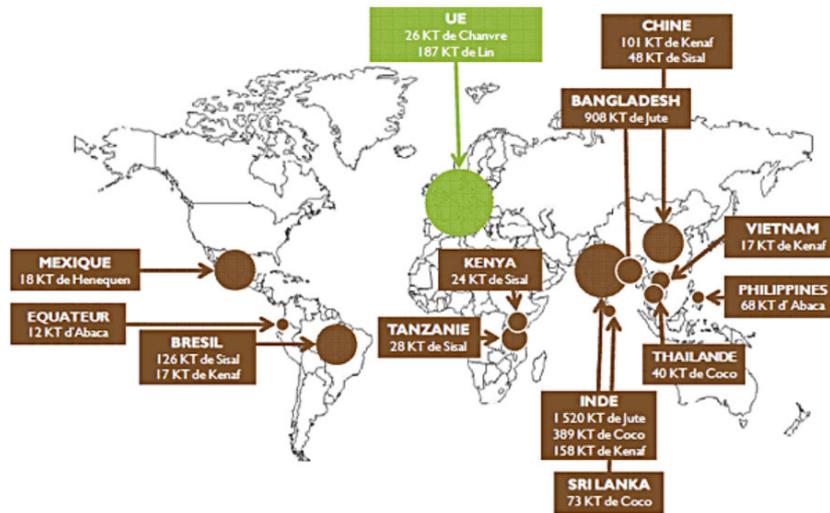


Figure I.2 : Production mondiale des fibres végétales [21]

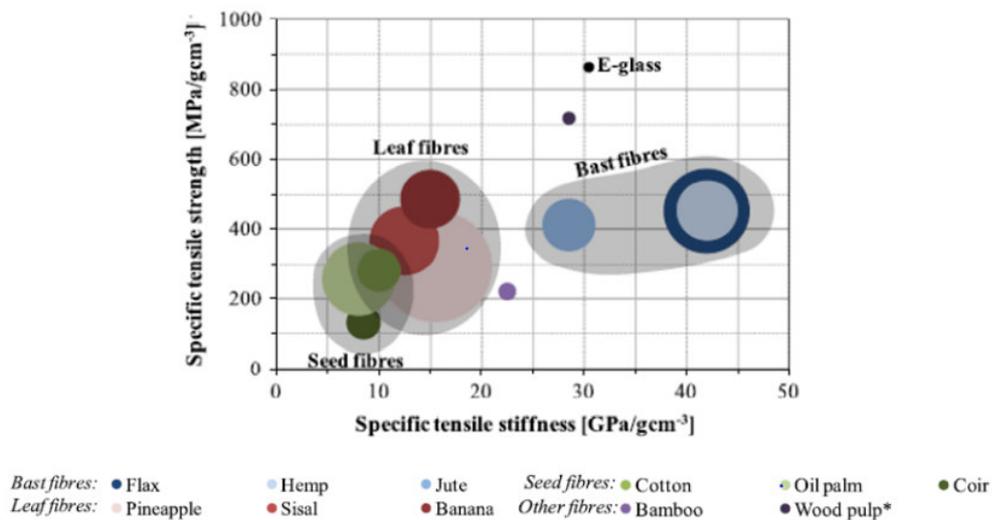


Figure I.3 : Comparaison des propriétés spécifiques des fibres végétales et des fibres de verre [22]

La classification des fibres naturelles démontre la variabilité de ces fibres selon leur origine. Les fibres végétales apparaissent comme les fibres les plus prometteuses pour le développement des matériaux composites avec un impact environnemental et un coût de fabrication réduit.

I.2.2. Intérêt écologique et enjeu socio-économique

La sensibilisation croissante du monde entier aux problématiques de développement durable contribue à de nombreuses initiatives visant à rechercher et appliquer des solutions plus respectueuses de l'environnement dans les activités industrielles [23]. Les préoccupations

I.État de l’art sur le développement des matériaux composites à base de fibres naturelles

écologiques ont donné lieu à un regain d’intérêt pour les matériaux naturels et leur recyclabilité. Actuellement, la production des renforts se fonde sur l’utilisation de ressources non renouvelables, qui entraîne la production de matériaux composites difficilement recyclables. L’une des solutions envisagée consiste à remplacer les fibres synthétiques par les fibres naturelles [24]–[26]. L’incorporation des fibres naturelles dans les matériaux composites vise à répondre aux préoccupations environnementales et notamment la consommation énergétique, le recyclage et l’empreinte en carbone de ces matériaux composites. L’impact de la production des fibres naturelles sur l’environnement est un facteur important à considérer pour l’évaluation du potentiel de ces fibres. La production d’un kilo de fibres de chanvre demande 15 fois moins d’énergie et 30 fois moins d’émission de CO₂ que la production d’un kilo de fibres de verre (Tableau I-1) [27]. La comparaison de la consommation énergétique et de l’empreinte en carbone des fibres naturelles et synthétiques est en faveur des fibres naturelles [19]. La fabrication et l’utilisation d’un matériau passent par plusieurs étapes incluant le cycle de vie du matériau, en commençant par les ressources en matières premières en passant par la production jusqu’à la fin de vie. L’analyse du cycle de vie de la fibre de lin et de verre illustrée en Figure I.4, démontre que la fibre de lin est entièrement biodégradable contrairement à la fibre de verre. La fin de vie des matériaux composites varie selon la nature des constituants du matériau [28]. Plusieurs scénarios peuvent être envisagés comme le recyclage par broyage mécanique, le recyclage par remoulage et la valorisation énergétique [5],[8]. Dans tous les scénarios de fin de vie, l’impact sur l’environnement des matériaux composites à base de fibres naturelles est nettement inférieur à celui des matériaux composites à base de fibres synthétiques.

Tableau I-1 : Comparatif de l’impact environnemental de la production de la fibre de chanvre et de verre[27]

	Chanvre	Verre
Consommation énergétique	3,4 MJ	48,3 MJ
Emission de CO₂	0,64 Kg	20,4 Kg
Emission de SO_x	1,2 g	8,8 g
Emission de NO_x	0,95 g	2,9 kg
DBO (demande biologique en oxygène)	0,265 mg	1,75 mg
DCO (demande chimique en oxygène)	3,23 g	0,02 g

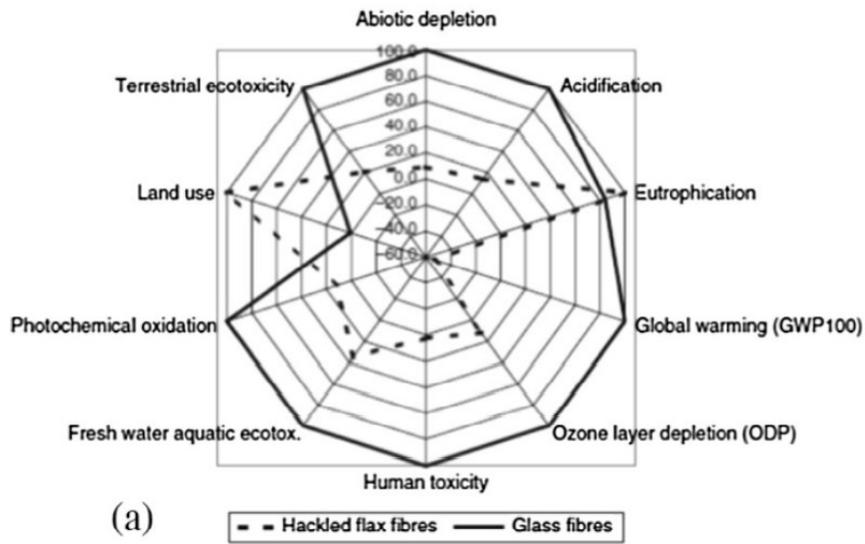


Figure I.4 : Analyse du cycle de vie de la fibre de lin (hackled flax fibre) et de la fibre de verre (glass fibre) [28]

La filière des fibres naturelles permet de créer de nouveaux emplois dans les territoires ruraux et urbains. Ceci permet d'intégrer les populations des zones rurales et urbaines dans le processus du développement durable et d'augmenter le sens de la responsabilité vis-à-vis de l'environnement. En général, l'intérêt à utiliser des fibres naturelles contribue à un apport dans la structuration sociale des pays [29]. Dans ce cadre, l'organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) a encouragé les coopérations internationales et nationales afin d'augmenter les revenus des agriculteurs à faible revenu [30].

Le critère de prix des fibres naturelles est un point non-négligeable dans l'étude comparative par rapport aux fibres synthétiques. Les prix des fibres naturelles et de verre, illustrés dans la Figure I.5. indiquent que ceux des fibres naturelles sont inférieurs à ceux des fibres de verre de 10,5 à 19,4 %. L'introduction des fibres naturelles dans le développement des matériaux composites est un choix intéressant sur le plan financier. Les fabricants dans le domaine automobile ont opté pour l'incorporation des fibres naturelles dans la production des matériaux composites afin de répondre aux normes environnementales imposées. Dans ce cadre, le projet **REFIVERT** supporté par l'université de Bretagne Sud et l'équipementier **TREVES** vise à remplacer la fibre de verre par la fibre de chanvre dans les pièces de structure automobiles. Les composites réalisés sont à base de matrice PP recyclé et 10% de fibres de chanvre. Les résultats de caractérisation ont démontré le compromis réussi entre le coût et la performance du matériau [27].

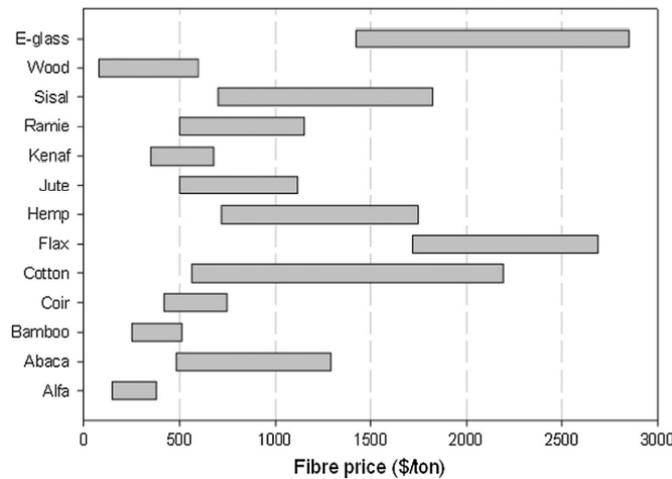


Figure I.5 : Comparatif du prix de vente par tonne de la fibre de verre et des fibres naturelles[31]

De manière générale, l'utilisation des fibres naturelles a un impact positif sur le plan environnemental, économique et social par rapport aux fibres synthétiques.

I.2.3. Propriétés physico-chimiques des fibres naturelles

I.2.3.1. Composition des fibres naturelles

Les caractéristiques des fibres naturelles et plus précisément des fibres végétales dépendent de la structure des constituants des fibres. La structure de la fibre de sisal est assimilable à un matériau composite renforcé par des fibrilles de cellulose [6],[23]. La fibre comporte de nombreuses cellules fibreuses allongées qui se rétrécissent vers chaque extrémité. Les cellules fibreuses sont reliées entre elles par des lamelles centrales qui comprennent l'hémicellulose, la lignine et la pectine [33]. La fibre de sisal contient environ 100 cellules fibreuses [34]. La fibre végétale est constituée d'une paroi primaire, d'une paroi secondaire et d'une zone centrale de lumen (Figure I.6). La paroi primaire de la fibre comporte peu de cellulose, environ 8 à 14% [6],[26], elle est située dans une matrice de composition proche des pectines de la lamelle moyenne [19]. La paroi secondaire comporte la quantité majeure de la cellulose dans les trois couches (S1, S2 et S3), Figure I.7, et notamment dans la couche S2 située au milieu de la paroi secondaire. L'orientation des fibrilles de cellulose au sein de la paroi secondaire suit l'angle micro-fibrillaire par rapport à l'axe longitudinal de la fibre (Figure I.7). L'angle micro-fibrillaire et la teneur en cellulose de la fibre sont des facteurs importants pour l'évaluation des propriétés mécaniques de la fibre. La lamelle moyenne réunit les parois de la fibre contenant les pectines et la substance amorphe. L'observation microscopique (MEB/MET) des parois

I.État de l’art sur le développement des matériaux composites à base de fibres naturelles

cellulaires a permis de mesurer le diamètre à différentes échelles des fibrilles. Le diamètre des macro-fibrilles ,des microfibrilles et des fibrilles élémentaires de la fibre de lin est de 0,5 μm , de 10 nm et de 3,5 nm respectivement [36].

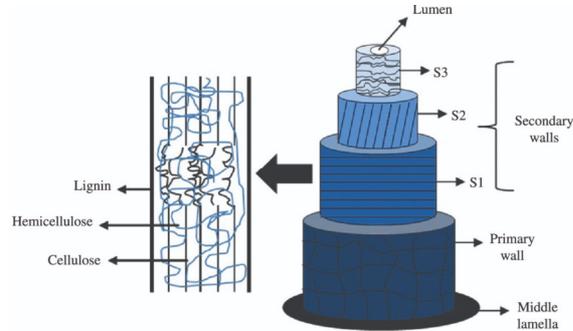


Figure I.6 : Représentation schématique d'une cellule de la fibre végétale [37],[38]

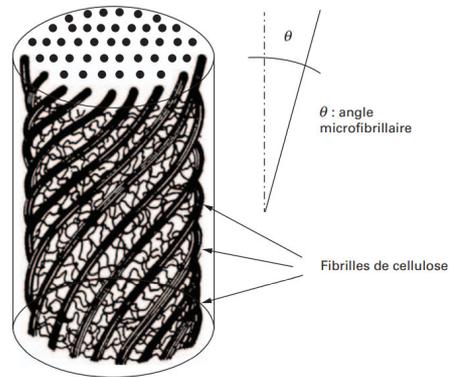


Figure I.7 : Positionnement des fibrilles de cellulose dans la paroi secondaire de la fibre végétale [39]

La nature de la fibre végétale permet d'identifier l'eau comme molécule indispensable ainsi que les polymères à base de sucre (glucides) dans la composition de la fibre. La composition de la fibre varie en fonction des conditions climatiques et le lieu de croissance de la plante. Les principaux constituants chimiques de la fibre végétale sont la cellulose, l'hémicellulose, la lignine et les pectines [40]. La cellulose est le composant principal de la fibre, sa structure moléculaire (Figure I.8) indique la présence des groupes hydroxyles responsables de l'aspect hydrophile des fibres naturelles.

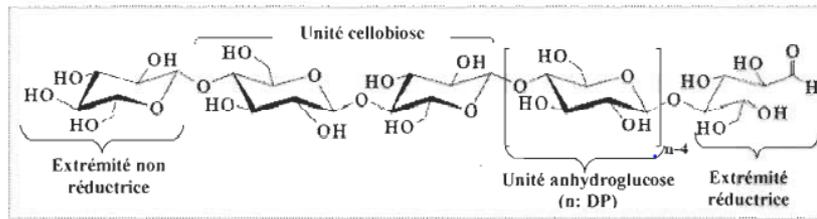


Figure I.8 : Structure moléculaire de la cellulose [41]

La lignine est le second composant principal en termes de teneur. Son rôle est d'assurer la rigidité, l'imperméabilité à l'eau et le stockage des déchets du végétal. Sa structure moléculaire (Figure I.9) comprend une macromolécule hétérogène à partir de trois alcools phénoliques (syringyle, guaiacyle et p-hydroxyphényle) [41].

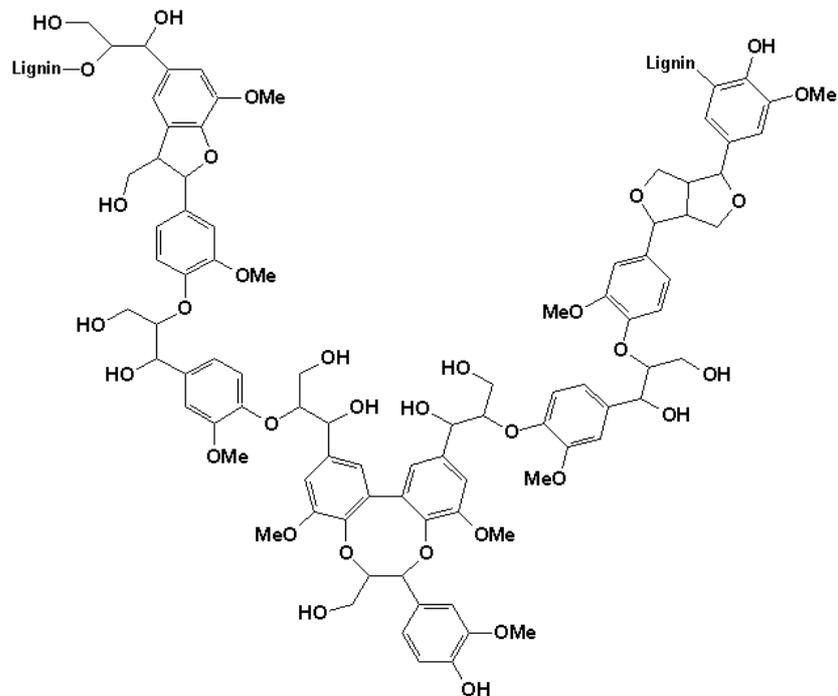


Figure I.9 : Structure moléculaire d'un modèle de la lignine [42]

L'hémicellulose est le troisième composant principal dans la composition de la fibre, et fait partie des polysaccharides amorphes (Figure I.10) solubles dans l'eau et extraites à partir des cellules végétales par les solutions alcalines. Il établit des liaisons avec les microfibrilles de cellulose et les autres composants afin d'assurer la cohésion de la paroi [43].

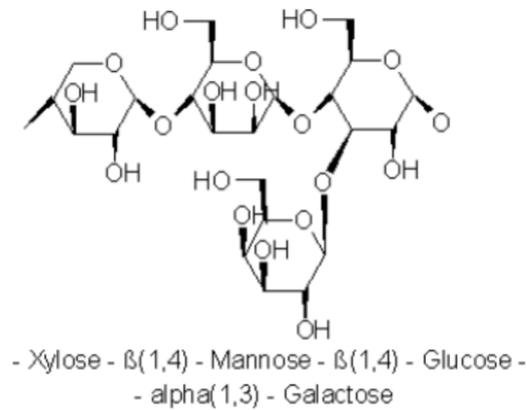


Figure I.10 : Structure chimique d'un type d'hémicellulose [43]

Les pectines se positionnent dans le lumen et la paroi primaire des cellules végétales en proportion minimale par rapport aux principaux composants. Sa fonction est de maintenir la cohésion entre les cellules des tissus végétaux en assurant la rigidité de la cohésion. Les pectines appartiennent à la famille des polysaccharides linéaires. Son rôle de ciment intercellulaire permet d’avoir les liaisons avec les autres composants (cellulose, lignine, hémicellulose) [43].

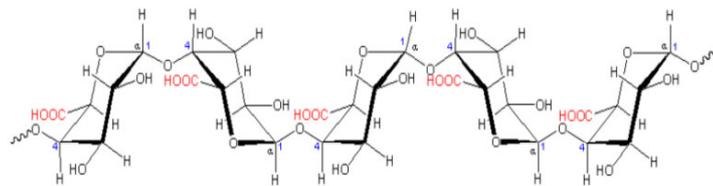


Figure I.11 : Structure moléculaire des pectines [43]

L’organisation hiérarchique des différents composants de la structure de la fibre végétale représente la complexité de sa composition chimique. La détermination des pourcentages des différents constituants de la fibre par rapport à la masse sèche de la fibre permet de mieux comprendre la performance de la fibre. Le Tableau I-2 indique la composition chimique et les proportions en pourcentage des constituants des fibres végétales les plus performantes.

Tableau I-2 : Composition Chimique des fibres végétales [44],[45]

Fibre	Cellulose (%)	Lignine (%)	Hémicellulose & pectines(%)	Origine
	78	8	10	Inde [46]

I.État de l’art sur le développement des matériaux composites à base de fibres naturelles

Fibre de sisal	64,4	10,4	13,7	Chine [47]
	65-68	9,9-14	10-22	Malaisie [48]
Fibre de lin	71	2,2	18,6-20,6	France [45]
Fibre de chanvre	70-74	3,7-5,7	17,9 – 22,4	France [44]

I.2.3.2. Longueur et Diamètre des fibres naturelles

La longueur des fibres naturelles est le premier paramètre important influençant sur les propriétés mécaniques aux différentes échelles (fibre, fil et tissu). La forme discontinue de la fibre naturelle dépend de sa structure chimique et physique et de sa morphologie. Le procédé d’extraction de la fibre est aussi un facteur affectant la longueur de la fibre. La complexité de la composition de la fibre naturelle, détaillée à la section I.2.3, montre la difficulté de l’individualisation des fibres à partir des faisceaux extraits. L’extraction manuelle des fibres élémentaires est la méthode la plus répandue sans dégradation des fibres [49]. La longueur des fibres végétales dépend de leur position au sein de la plante. La longueur moyenne des fibres végétales les plus utilisées varie entre 30 et 70 mm pour les fibres de sisal et entre 5 et 80 mm pour les fibres de lin [37],[38]. L’étude approfondie de la distribution et la dispersion des longueurs des fibres représente un indicateur significatif sur la qualité de la fibre [42].

Le diamètre des fibres naturelles est également un paramètre important affectant les propriétés mécaniques des fibres. L’organisation complexe de la structure des fibres naturelles s’illustre dans la section des fibres avec une géométrie polygonale et non cylindrique. La détermination de la surface utile des fibres naturelles dans la littérature a été effectuée en occultant la présence du lumen. La variation de la rigidité et la résistance des fibres végétales (lin [52], chanvre [53] et sisal [54]) sont liés à la variation du diamètre tout au long de la fibre. La rupture des fibres végétales est pilotée par la présence de défauts, en particulier plus le diamètre des fibres est élevé plus la présence de défauts est significative en accélérant la rupture des fibres [55].

I.2.3.3. Densité des fibres naturelles

La densité des fibres naturelles est un paramètre important affectant de façon directe le poids du matériau réalisé avec ces fibres. Dans le domaine des matériaux composites, les fibres synthétiques ayant une densité élevée conduisent à des composites avec un poids élevé. Les fibres avec une plus faible densité, comme les fibres naturelles, sont recommandées pour les

I.État de l'art sur le développement des matériaux composites à base de fibres naturelles

matériaux composites appliqués dans les domaines de l'aéronautique et de l'automobile [42].

La mesure de la densité se base sur la détermination de deux grandeurs : la masse et le volume. La masse est une grandeur immédiatement accessible par la mesure, contrairement au volume qui peut présenter des difficultés expérimentales pour sa détermination [56]. Généralement, la méthode de mesure de la densité est basée sur l'immersion du matériau dans un liquide, le volume est calculé en fonction du déplacement du liquide. Cette méthode présente des problèmes avec un matériau poreux, et plus particulièrement avec les fibres naturelles en vue de leur nature hydrophile. En effet, le volume mesuré par cette méthode ne correspond pas au volume des fibres naturelles avec une structure creuse [33],[43]. La méthode la plus recommandée pour la densité des fibres naturelles est la mesure par pycnomètre à gaz. L'utilisation de l'hélium comme gaz de référence permet d'accéder aux pores les plus fins, rendant ainsi la mesure de la masse volumique très précise. La densité des fibres végétales varie entre 1,4 et 1,5 g/cm³ [56].

I.2.4. Propriétés thermomécaniques des fibres naturelles

Le potentiel des fibres naturelles dans le renforcement des matériaux composites est dû aux différentes propriétés qu'elles présentent. Les avantages de ces fibres sont liés à leur composition physico-chimique et leurs morphologies. La performance et la stabilité thermomécanique sont des caractéristiques importantes pour l'évaluation des avantages des fibres naturelles par rapport aux fibres synthétiques.

I.2.4.1. Propriétés thermiques

L'utilisation des fibres naturelles comme renfort des matériaux composites nécessite la compréhension et la prévision des propriétés thermiques de ces fibres [57]. La décomposition thermique des fibres naturelles est étudiée par analyse thermogravimétrique (TGA) [45],[46]. Cette méthode d'analyse permet d'étudier la perte de masse des fibres en fonction de la température. La dégradation thermique des fibres naturelles débute par la déshydratation en vue de leur nature hydrophile. Ensuite, le premier composant principal qui se décompose est l'hémicellulose, puis la lignine et la cellulose [57]. La diminution de la température de début de dégradation et le déplacement des pertes de masse à des températures inférieures conduisent à une faible stabilité thermique. La meilleure stabilité thermique des fibres naturelles dépend du faible taux d'hémicellulose dans la structure. La température de dégradation des fibres

I.État de l’art sur le développement des matériaux composites à base de fibres naturelles

naturelles permet de choisir la matrice et la température de mise en œuvre des composites. Moriana et al. [57] ont montré l'influence de la structure hétérogène des hémicelluloses en termes de liaison et de structure de ramification sur la décomposition thermique des fibres naturelles.

I.2.4.2. Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques des fibres naturelles sont affectées par plusieurs paramètres. Ces paramètres sont notamment les conditions liées à la croissance de la plante (maturité, variété de semis), les conditions climatiques (saison, température), ainsi que les étapes de préparation des fibres (procédé d'extraction, séchage). La manipulation des fibres naturelles doit être prise avec précaution de la récolte à l'extraction pour garantir la performance mécanique des fibres naturelles [24]. L'impact de ces paramètres sur la structure interne et la composition chimique des fibres naturelles se traduit au niveau du module de Young et de la résistance à la traction des fibres lors de l'application des sollicitations mécaniques. Silva et al. [54] ont démontré que la variabilité et la dispersion des propriétés en traction de la fibre de sisal est due à la variabilité de la géométrie de la fibre (longueur et diamètre), qui est en corrélation avec les conditions de culture de la plante d'Agave Sisalana. Les propriétés en traction des fibres naturelles sont identifiées par deux méthodes, soit par des essais sur fibre unitaire ou à partir d'essai d'IFBT sur des faisceaux ou des fils imprégnés [60], suivis à l'aide de la loi des mélanges, de la détermination des propriétés des fibres. Dans la suite des travaux présentés, les propriétés de la fibre de sisal d'origine marocaine seront identifiées dans le chapitre suivant.

I.2.4.2.1. Méthode de caractérisation sur fibres unitaires

L'essai de traction sur fibre unitaire permet de déterminer le comportement en traction des fibres naturelles. Plusieurs travaux menés sur l'évaluation du comportement en traction des fibres naturelles ont montré que la nature de l'origine des fibres influent sur les propriétés des fibres [38],[49]. Par exemple, les fibres libériennes (issues du phloème, de la tige, ou de l'écorce de certaines plantes : lin, chanvre) présentent un comportement non-linéaire en traction [24]. Tandis que, les fibres foliaires (issues des feuilles des plantes telles que le sisal) présentent un comportement quasi-élastique en traction [12]. Cette méthode de caractérisation permet d'obtenir directement les caractéristiques de ce comportement en traction (effort, allongement à rupture) des fibres. Pourtant, la mise en œuvre de l'essai, du fait de la complexité de

l’individualisation des fibres élémentaires, est difficile, les fibres élémentaires glissant les unes sur les autres en raison de la qualité de la pectine qui maintient les fibres élémentaires entre elles. De plus, lors des essais, les fibres élémentaires peuvent glisser entre les mors ce qui perturbe la mesure des propriétés en traction des fibres [51],[52]. Les propriétés en traction des fibres naturelles sont analysées dans différents travaux montrant la variabilité des valeurs de ces fibres en fonction de l’origine des fibres, des conditions de culture et la région de plantation [6],[23],[50]. La performance mécanique des fibres naturelles restent inférieures à celle des fibres synthétiques comme le montre le Tableau I-3 [50],[53]–[55].

Tableau I-3 : Propriétés Mécaniques des fibres naturelles et synthétiques [12], [62]–[64]

Fibres Naturelles	Résistance à la traction (MPa)	Module de Young (GPa)
Fibre de Chanvre	40	37,5
Fibre de Sisal	350-800	9,4-23
Fibre de Lin	345-1100	27,6
Fibre de Verre	1800-3500	70-73

I.2.4.2.2. Méthode de caractérisation sur les faisceaux ou fils imprégnés

La méthode alternative de la caractérisation en traction sur fibres unitaires est l’essai de traction sur des faisceaux ou des fils imprégnés (IFBT : Impregnated Fiber Bundle Test). Cette méthode consiste à élaborer des composites unidirectionnels à partir des faisceaux ou fils des fibres imprégnées. Ensuite, les éprouvettes des composites sont testées en traction dans la direction des fibres et les propriétés des fibres sont déduites à l’aide de la loi des mélanges [60]. L’IFBT (Impregnated Fiber Bundle Test) présente plusieurs avantages, tels que : la simplicité de la mise en œuvre de l’essai en se basant seulement sur l’élaboration et la caractérisation des composites unidirectionnels, la détermination de la rigidité et de la contrainte effective des fibres avec précision et la réalisation des composites avec de nombreux produits fibreux (fils, mèches, rubans). Cependant, la qualité de l’imprégnation des fibres par la résine affectent les résultats obtenus par l’IFBT. De ce fait, plusieurs paramètres doivent être pris en compte pour le calcul des propriétés des fibres, tels que la porosité des éprouvettes ou le niveau de torsion des produits fibreux [60], [67].

I.2.5. La fibre de sisal

La fibre de sisal est une fibre végétale issue de la biomasse. Les atouts écologiques et économiques de cette fibre contribuent à l’étude du potentiel de la fibre de sisal dans le renforcement des matériaux composites.

I.2.5.1. Présentation Générale

La fibre de sisal est issue des feuilles d’une plante succulente appartenant à la famille des Agavacées, qui est la plante d’Agave Sisalana (Figure I.12). La plante est originaire d’un commerce ancien de fibres textiles dans le Yucatan (l’est du Mexique). Elle a été apportée dans les régions tropicales en Inde entre 1885 et 1892 , en Tanzanie en 1893 et en Kenya entre 1903 et 1908 [68]. Les premières plantations d’Agave Sisalana en Afrique ont été effectuées par les colonies britanniques dans l’Afrique orientale et par l’empire français en Afrique du Nord. Le territoire africain convient parfaitement à la culture du sisal [69].

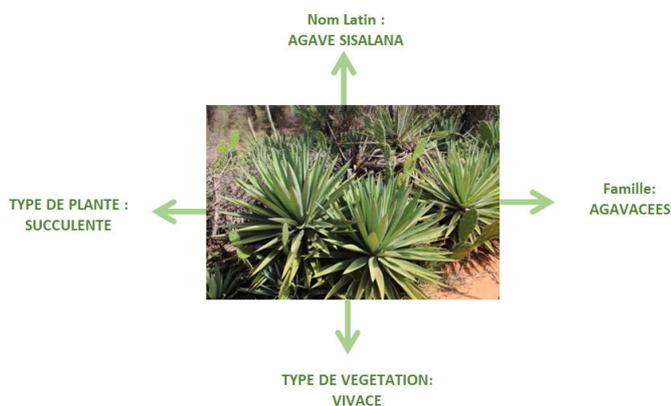


Figure I.12 : Classification Botanique de la plante d’Agave Sisalana

La plante d’Agave Sisalana se positionne à la sixième place parmi les plantes à fibres, en couvrant 2% de la production mondiale des fibres végétales. La production des fibres de sisal en 2019 a atteint 300 000 tonnes avec une dominance de la fibre d’origine brésilienne. Les trois pays premiers producteurs au monde du sisal sont le Brésil, la Tanzanie et le Kenya. Au cours de ces dernières décennies, le prix du sisal a augmenté jusqu’à environ US\$ 592/tonne. Les fibres de sisal cultivées sur le continent africain ont de meilleures performances mécaniques par rapport à celles des fibres cultivées dans les autres continents [70]. Cependant, l’abondance de fibre de sisal en Afrique n’est pas complètement exploitée et plus précisément en Afrique du Nord (Maroc). La plante d’Agave Sisalana se situe au nord du Maroc et plus précisément

I.État de l’art sur le développement des matériaux composites à base de fibres naturelles

dans la province de Taounate (Figure I.13). Les strates bioclimatiques de la province de Taounate favorisent la présence abondante du sisal dans le nord (à 62%) et à un degré moindre au sud (à 35%) de la province de Taounate [71].

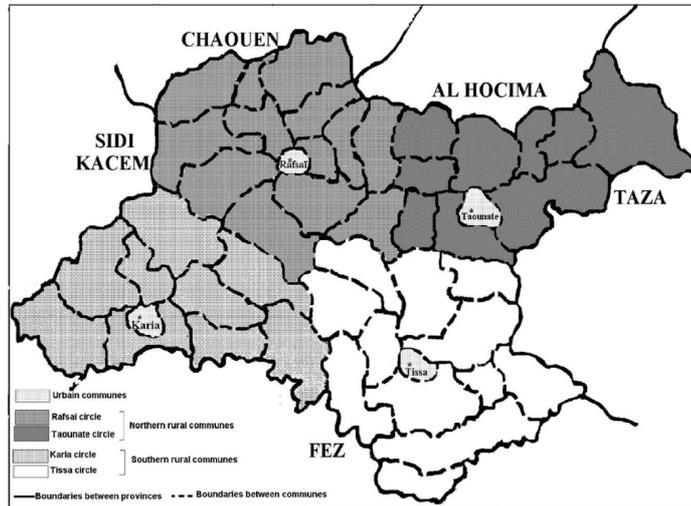


Figure I.13 : Province de Taounate (Nord Du Maroc)[71]

En général, la plante d’Agave Sisalana est une herbacée de 3 à 9 mètres de haut à la floraison. Chaque feuille comprend 1000 à 1200 faisceaux de fibres avec une teneur moyenne de fibres de 3,5 à 5% ; cependant, durant le cycle de vie de la plante, la teneur en fibres augmente de 2 à 5%. Deux types de fibres se distinguent dans la feuille de sisal (Figure I.14) : les fibres mécaniques et les fibres rubanées. Les fibres mécaniques comprennent 75% des fibres de la feuille en se concentrant en 3-4 rangs dans la zone périphérique, elles maintiennent la feuille rigide et se fractionnent rarement pendant la transformation. Les fibres rubanées, composant 25% des fibres foliaires, se situent au centre de la feuille afin de former l’épine terminale. Les fibres mécaniques extraites de la feuille de l’Agave Sisalana font partie de 70% des fibres les plus rigides du monde [70].

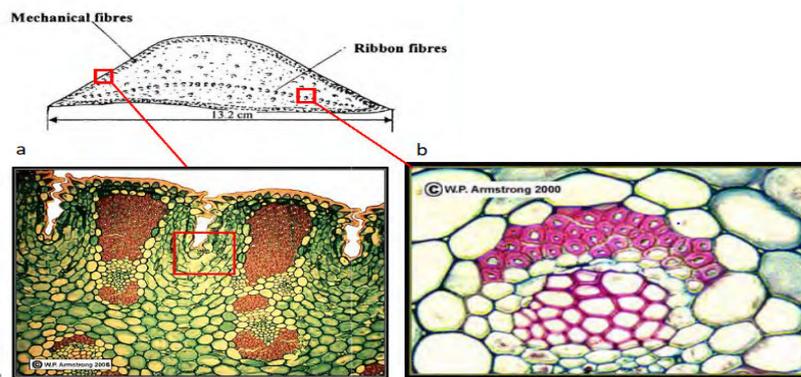


Figure I.14 : Coupe Transversale de la feuille de la plante Agave Sisalana a)-Détail des faisceaux cribro-vasculaires des fibres mécaniques b) Détail des faisceaux cribro-vasculaires des fibres rubanées [72]

I.2.5.2. De la plantation à l'extraction de la fibre

La plante d'Agave Sisalana pousse généralement dans les régions arides et semi-arides. Sa culture est assez simple grâce à sa résistance aux maladies et à sa capacité de stockage d'eau. La plantation est recommandée entre le mois de mai et le mois d'août. La plante produit entre 200 et 250 feuilles durant son cycle de vie, qui dure entre 6 à 9 ans en fonction des conditions climatiques. La première récolte est recommandée lorsque la longueur des feuilles dépasse 60 cm. Les feuilles avec une longueur inférieure de 60 cm, car les décortiqueuses mécaniques ne peuvent pas les traiter. La durée entre la première récolte et la plantation dépend de la température, la pluviométrie et la vitesse de la production des feuilles. La première coupe commence généralement dans les régions arides et dans les régions semi-arides entre 2 et 4 ans après la plantation. La récolte se poursuit deux fois par an pendant environ 5 à 8 ans. La dernière récolte est effectuée lorsque 80% de la plante forme une hampe florale (Figure I.15). A chaque coupe, une surface foliaire suffisante est laissée afin d'aider à la croissance de la plante. Les feuilles doivent être conservées dans des conditions équilibrées pour préserver la qualité des feuilles avant l'extraction des fibres [70].



Figure I.15 : Récolte des feuilles de la plante d'Agave Sisalana [73]

L'extraction des fibres est facilitée si elle est effectuée rapidement après la récolte des feuilles. Historiquement, le premier procédé d'extraction a été fait en martelant les feuilles et en grattant la pulpe des feuilles avec un couteau [45],[74]. L'extraction par rouissage à l'eau est utilisée dans quelques pays tels que l'Inde pour séparer la fibre de la plante. Les feuilles sont plongées dans de l'eau durant trois semaines, ensuite les fibres sont séparées, lavées et séchées au soleil. Le procédé d'extraction mécanique est le procédé le plus rentable à l'aide d'une décortiqueuse mécanique [75]. Les étapes du procédé mécanique comportent : le broyage, le raclage, le lavage des tissus foliaires parenchymateux et la séparation des fibres. Après la décortication, les fibres sont lavées et séchées au soleil. Lors de la dernière étape, les fibres sont battues et peignées pour libérer les faisceaux individuels et éliminer les impuretés. Le rendement d'extraction des fibres à partir des feuilles s'estime à environ 3,5 kg de fibres pour 100 kg de feuilles, avec 92 à 96% de filasse et 4 à 8% d'étoupes [70].

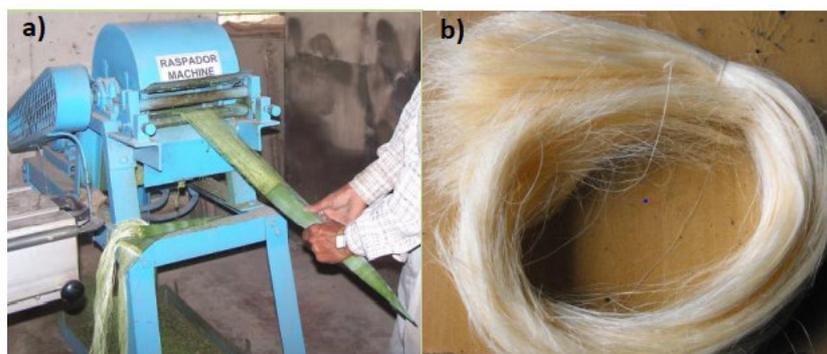


Figure I.16 : Procédé d'extraction mécanique des fibres de sisal : a) décortiqueuse mécanique, b) fibres de sisal extraites [76]

I.2.5.3. Domaines d'applications

La classification des domaines d'usage des fibres de sisal dépend de la qualité des fibres. Les fibres longues qui font partie des fibres dures sont généralement utilisées pour la fabrication des ficelles à balles, des ficelles de liage, des cordes, des ficelles à usage maritime et des tissus à lustrer. Les fibres courtes sont exploitées pour la production des tapis et des panneaux de construction. Les fibres de sisal sont aussi utilisées dans l'industrie du papier afin d'améliorer la performance du papier filtre à base de pâte de cellulose de bois. Les propriétés mécaniques élevées et la porosité de la pâte de cellulose de sisal conduisent à remplacer la source de pâte conventionnelle pour la fabrication des papiers dans l'industrie alimentaire et dans l'industrie du tabac [70]. La performance mécanique, la biodégradabilité et la faible densité de la fibre de sisal sont des facteurs prometteurs pour évaluer le potentiel du sisal dans le renforcement des matériaux composites. Ces dernières années, le constructeur automobile Daimler a commencé à introduire la fibre de sisal dans la production des matériaux composites pour des véhicules basés en Afrique du sud [77].

Les résidus de l'extraction des fibres de sisal représentent 98% de la plante, présentant une source faiblement utilisée. Les pays producteurs de sisal en Afrique du sud ont participé à une démarche de valorisation des déchets de sisal en créant des usines de traitement des déchets de sisal [70]. Ces déchets peuvent être employés dans la production du biogaz afin d'alimenter les zones rurales en électricité.

En général, l'utilisation de la fibre de sisal est limitée aux pays producteurs en Afrique et plus précisément au Maroc. La fibre de sisal est employée dans la confection des ficelles, des cordes et des tissus. Tandis que la plante d'Agave Sisalana est fortement utilisée dans la médecine traditionnelle pour les maladies de la peau, en plus de son utilisation contre la syphilis, la tuberculose et la jaunisse [70],[71]. Dans la suite de ces travaux de thèse, le potentiel de la fibre de sisal d'origine marocaine sera évalué en tant que renforcement des matériaux composites à différentes échelles.

I.3. Introduction sur les structures textiles en fibres naturelles

Les structures fibreuses présentent un assemblage de fils sous différentes formes. Ces structures sont de plus en plus utilisées pour le renforcement des matériaux composites, car elles permettent de répondre à de nombreuses spécifications industrielles telles que : la

I.État de l’art sur le développement des matériaux composites à base de fibres naturelles

réalisation des formes complexes et la stabilité dimensionnelle [78]. Les propriétés des structures textiles dépendent non seulement des propriétés des fibres mais aussi du type d’arrangement des fibres. Selon le domaine d’applications des structures fibreuses, différentes architectures sont conçues et classifiées en fonction de la structure de la préforme et le procédé de fabrication (Figure I.17) [79]. Plusieurs critères complémentaires sont pris en compte pour dissocier les structures fibreuses, tels que : le critère dimensionnel et l’orientation des fibres [80].

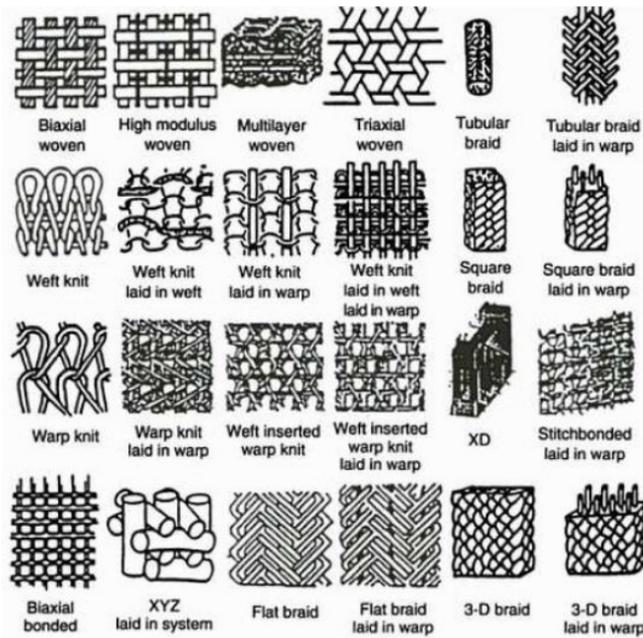


Figure I.17 : Classification des structures fibreuses [79]

AXIS Dimension	Non-axial	Mono-axial	Biaxial	Triaxial	Multi-axial
1D		Roving yarn			
2D	Chopped	Pre-impregnation sheet	Plane weave	Triaxial weave	Multi-axial
3D	Linear element	Strandmat	3D braid	Multi-ply WEAVE	Triaxial 3D weave
	Plane element	Laminate type	H or I beam	Honeycomb type	Multi-axial 3D weave

Figure I.18 : Classification Complémentaire proposée par Fukuta [80]

Les trois familles conventionnelles des structures textiles se classent en fonction du critère dimensionnel. Cette classification permet d’avoir une vision claire et de choisir les renforts fibreux appropriés à chaque application des matériaux composites.

- Structures textiles unidirectionnelles (UD)

Les structures textiles unidirectionnelles représentent un arrangement de mèches parallèles selon une direction spécifique (Figure I.19). Les fils ou mèches utilisés dans la fabrication des UD sont plats (pas d'embuvage) et très faiblement tordus. Ce type de structure offre plusieurs avantages tels que : le procédé de fabrication automatisable et la possibilité d'orienter les fibres dans une direction préférentielle. Les composites à base des renforts UD présentent une meilleure rigidité dans la direction des fibres en comparaison avec les composites à base des structures fibreuses classiques. Cependant, dans la direction transverse la rigidité est faible [78].

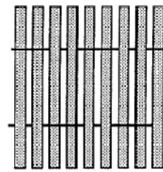


Figure I.19 : Structure Fibreuse Unidirectionnelle [78]

- Structure textiles bidirectionnelles (2D)

Les structures textiles bidirectionnelles se décrivent par des préformes sous forme de l'entrecroisement de deux nappes de fils orientées perpendiculairement. Elles peuvent être fabriquées avec différents procédés (tissage, tricotage, tressage), Figure I.20. Les structures 2D offrent une meilleure résistance mécanique dans les deux directions (direction chaîne et trame) contrairement aux structures UD.



A. Structure Tissée B. Structure Tressée C. Structure Tricotée

Figure I.20 : Classification des Structures Textiles Bidirectionnelles : A. Structure Tissée, B. Structure Tressée et C. Structure Tricotée [81]

- Structures textiles tridirectionnelles (3D)

Les structures textiles tridirectionnelles sont développées pour répondre aux applications spécifiques et répondre aux limites des structures 3D constituées d'empilement de structures 2D (faible résistance au délaminage, instabilité dimensionnelle) [82]. Le procédé de fabrication

des structures 3D conduit à l'augmentation du coût et la durée de production en comparaison de celle des structures 2D. Les procédés de fabrication conventionnels de structures 3D (Figure I.21) sont similaires aux procédés de fabrication des structures 2D (Tissage, Tressage, Tricotage).

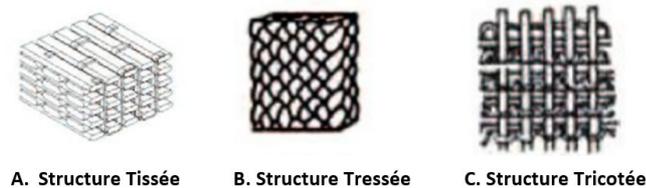


Figure I.21 : Classification des Structures Textiles Tri-directionnelles :A. Structure Tissée , B. Structure Tressée et C. Structure Tricotée [81]

Dans la littérature, les renforts fibreux à base de fibres naturelles sont développés sous différentes formes (non-tissé, tissé, UD) [60],[67],[68]. Les structures disposant d'orientations (UD, 2D, 3D) présentent les meilleures propriétés en comparaison avec celles ayant des orientations aléatoires [69],[70]. Les composites à base des renforts UD présentent une meilleure rigidité dans la direction des fibres en comparaison avec les composites à base des renforts fibreux à orientation aléatoire [78],[88]. Shah [22] a montré que les composites à base des renforts unidirectionnels en fibres naturelles offrent des propriétés en traction de 2 à 20 fois meilleures que les composites à base des renforts non tissé en fibres naturelles. Le tissage est l'un des procédés de fabrication les plus employés pour la fabrication de composites à base des fibres naturelles, en raison de la productivité élevée et diverse de structures tissées. Plusieurs paramètres influencent la performance des renforts bidirectionnels. Furkan et al [89] ont prouvé que la résistance à la traction et le module de Young des composites à base des tissus de lin et de la résine époxy sont affectés de manière significative par le type d'armure. L'armure toile représente les meilleures propriétés mécaniques des structures tissées bidirectionnelles à base de fibres de jute [90]. L'étude menée par Corbin et al. [91] a montré aussi que l'armure toile offre une meilleure résistance à la traction des tissus 2D à base de fibres de chanvre. Nagamadhu et al. [92] ont prouvé que les propriétés dynamiques mécaniques des composites à base de structures tissées 2D en fils de sisal sont influencées par le type d'armure. Corbin et al. [93] ont montré que les propriétés en traction des structures tissées à base de fibre de chanvre dépendent du type d'armure et de la densité des fils dans les deux directions chaîne et trame. Les structures fibreuses à base de fibre de chanvre avec les armures de tissage (toile et sergé de 6) présentent

I.État de l’art sur le développement des matériaux composites à base de fibres naturelles

un effort maximal à rupture supérieur en direction chaîne par rapport à la direction trame, tandis que la structure fibreuse avec l’armure de tissage (satin 6) présente un effort maximal à rupture inférieur en direction chaîne par rapport à la direction trame [93]. Les fibres naturelles pour le renforcement des composites sous forme de renfort fibreux 2D présentent des propriétés intéressantes qui se rapprochent du comportement des renforts fibreux à base des fibres synthétiques. De ce fait, des travaux sont menés par les chercheurs afin d’évaluer les propriétés des renforts fibreux 3D à base de fibres naturelles. Le tissage conventionnel pour les structures 3D permet de fabriquer des tissus 3D interlocks chaînes. Corbin et al. [94] ont montré que la combinaison de différents paramètres, tels que : le type d’armures et le niveau de torsion des fils influencent de façon significative les propriétés mécaniques des structures tissées 3D interlocks chaînes à base de fils de lin. Lansiaux et al. [95] ont démontré que la trajectoire du fil de chaîne de liage du tissu 3D interlock chaîne à base de fil de lin affecte différentes propriétés telles que : l’épaisseur, la densité des fils et le comportement à la traction des tissus 3D interlocks chaînes. Dans ces travaux de recherche, nous nous intéresserons aux structures fibreuses bidirectionnelles et tri-directionnelles tissées à base de fils de sisal.

I.3.1. Transformation des fibres naturelles en fils

L’utilisation des fibres naturelles dans le développement des renforts fibreux nécessite des propriétés spécifiques telles que la forme continue et la performance mécanique. De ce fait, la transformation des fibres naturelles de nature discontinue en fils permet de répondre à ces exigences. La filature est définie comme l’étape de transformation en fils à partir des fibres naturelles ou synthétiques. Les étapes conventionnelles de filature des fibres naturelles et plus particulièrement des fibres de sisal (Figure I.22) consistent à nettoyer et éliminer les impuretés des fibres naturelles avec un lavage à l’eau distillée et un séchage à la température ambiante. Ensuite, les fibres sont lubrifiées avec de l’huile de sésame pour les protéger de ruptures excessives lors de la fabrication des fils. Puis, les fibres sont orientées pour former un voile de fibres qui est regroupé sous la forme d’un ruban (étape de cardage). Les rubans sont étirés et tordus, pour avoir le titre souhaité, pour constituer des mèches. Les fils fabriqués sont peignés pour éliminer des fibres courtes. La dernière étape consiste à enrouler les fils sur des bobines [57],[58].

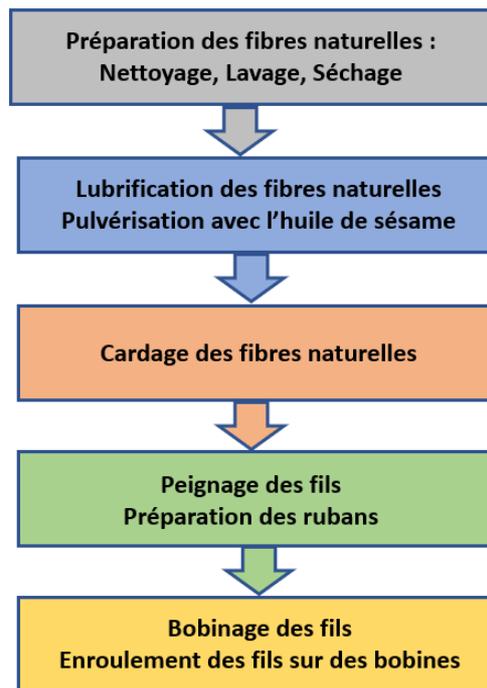


Figure I.22 : Processus Générale de Filature [96]

L'utilisation des fils dans la fabrication des textiles par tissage, tricotage et tressage exige une certaine ténacité pour être traitée par les machines textiles. La torsion après l'étirage des fils est une étape nécessaire pour la fabrication des fils tordus appropriés à l'industrie textile. Le niveau de torsion des fils est un paramètre important pour le développement de ces fils. L'étude menée par S. Goutianos et al. [98] a montré qu'avec un faible niveau de torsion, le glissement entre les fibres lors de sollicitations mécaniques, conduit à des fils à faible résistance (Figure I.23) [59],[60]. La torsion appliquée sur les fils ne doit pas dépasser un seuil critique. Comme l'illustre la Figure I.24, le niveau de torsion recommandé doit permettre de renforcer la cohésion entre les fibres afin d'augmenter la ténacité du fil [99].

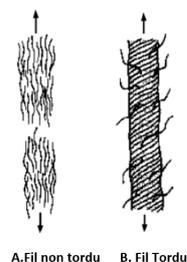


Figure I.23 : A. Fil non tordu et B. Fil tordu [83]

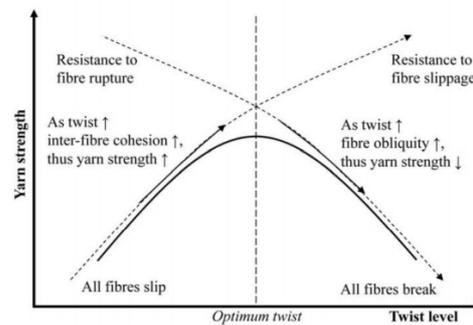


Figure I.24 : Impact de la torsion sur la résistance et la rupture des fils [99]

La torsion des fils affecte l'élaboration des matériaux composites et plus précisément l'imprégnation du renfort fibreux. La forte torsion des fils permet de les resserrer ce qui engendre la diminution de la perméabilité des fils et rend l'imprégnation plus compliquée, tandis que la torsion optimale permet d'augmenter les frictions inter-fibres et la perméabilité des fils. Le choix du niveau de torsion optimale des fils permet une performance mécanique non seulement à l'échelle du fil mais aussi à l'échelle du composite [59],[61].

I.3.2. Structures tissées bidirectionnelles

Les structures tissées bidirectionnelles sont des structures décrites par un entrecroisement entre deux fils orthogonaux en chaîne (à 0°) et en trame (à 90°) [100]. Ces structures sont fabriquées à l'aide d'une machine à tisser. Le procédé de tissage conventionnel sera détaillé à la section I.3.4. La fabrication des renforts fibreux tissés à l'aide des machines à tisser offre une productivité élevée et une réduction du coût de la fabrication des composites. Ce procédé de fabrication permet d'obtenir des structures 2D bi-axiales. Le maintien de la tension des fils de chaîne et l'entrecroisement des fils de chaîne et trame contribuent à l'abrasion et à la rupture des fibres. De ce fait, la résistance et la ténacité des fils sont réduites en comparaison avec les propriétés des fils des structures unidirectionnelles, comme le montre Curtis et Bishop [101].

Le mode d'entrecroisement des fils est généralement décrit par l'armure du tissu. Il existe trois armures fondamentales : Toile, Sergé et Satin, illustrées dans la Figure I.25. La toile est la structure la plus simple à réaliser. Elle est compacte et peu déformable grâce à un maximum d'entrecroisement des fils de chaîne et de trame. Le sergé présente un effet diagonal en faisant un décalage constant d'un fil de chaîne à chaque fil de trame. Cette armure est plus souple que l'armure toile. Le satin présente la structure la plus souple et lisse par rapport aux autres armures

(toile, sergé). Cela est dû à la faible densité d’entrecroisement des fils du satin.

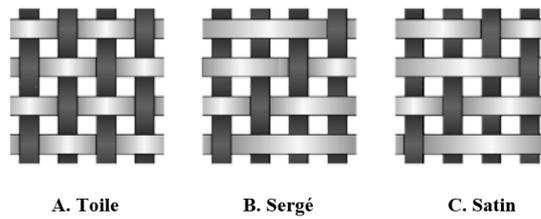


Figure I.25 : Armures fondamentales des structures tissées 2D: A. Toile, B. Sergé et C. Satin

I.3.3. Structures tissées 3D Interlocks Chaines

I.3.3.1. Définition des structures tissées 3D interlocks chaines

La structure tissée 3D interlock chaîne permet l’entrecroisement des fils dans le plan (chaîne et trame) et dans l’épaisseur [102]. Les structures tissées 3D Interlocks chaines sont fabriquées à l’aide d’une machiner à tisser classique en introduisant les fils dans le plan et à travers l’épaisseur. L’arrangement des différents fils dans la structure permet d’élargir le nombre d’architectures proposées pour le renforcement des composites. La représentation géométrique des structures tissées 3D interlocks chaines (Figure I.26) correspond à un empilement de couches des tissus 2D avec une liaison à travers l’épaisseur.

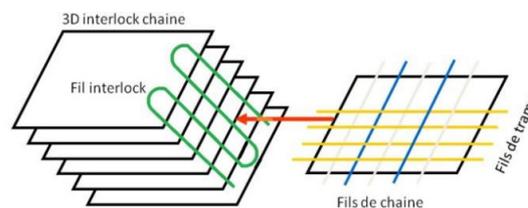


Figure I.26 : Représentation géométrique des structures tissées 3D interlocks chaines [103]

Les structures tissées 3D interlocks chaines peuvent être décrites en identifiant le rôle des différents types de fils au sein de ces structures (Figure I.27).

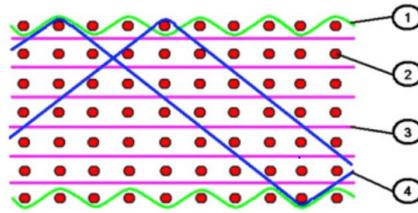


Figure I.27 : Représentation schématique par une coupe transversale des fils de trame d'une structure tissée 3D interlock chaîne [103]

- **Fil 1** représente les fils de chaîne de surface. Ces fils sont intégrés dans la surface supérieure ou inférieure de la structure. L'ajout de ces fils dans la structure permet de modifier l'état de surface du tissu. Ces fils n'influent pas significativement sur les propriétés mécaniques de la structure.
- **Fil 2** représente les fils de trame. Ces fils sont positionnés perpendiculairement au fil de chaîne et insérés à chaque formation de foule sur la machine à tisser. Les fils de trame déterminent le nombre de couches et les propriétés mécaniques transversales de la structure tissée 3D interlock chaîne.
- **Fil 3** représente les fils de chaîne de renfort. Ces fils sont également des fils de chaîne. Le rôle de ces fils est d'apporter les propriétés mécaniques longitudinales de la structure tissée 3D interlock chaîne [103].
- **Fil 4** représente les fils de chaîne de liage. Ces fils sont insérés à travers l'épaisseur pour lier les différentes couches de la structure. Le rôle de ces fils est de maintenir la cohésion et la stabilité dimensionnelle et d'apporter de la résistance inter laminaire de la structure.

Les structures tissées 3D interlocks chaînes ont été étudiées pour des applications dans les matériaux composites ou en solution de protection [63],[83]. Par manque d'exactitude de la définition des tissus 3D multicouches, différents travaux de recherche n'ont pas permis d'exploiter les résultats obtenus par le biais des paramètres produits et procédés. Pour cela, une définition générale détaillée des différents composants du tissu 3D interlock chaîne (nombre de fils de chaîne, nombre de fils de trame nombre de couches, armure de tissage, etc..) a été proposé par Boussu et al. [103] pour mieux décrire la position des différents fils situés au sein de la structure tissée 3D et se définit par :

Tissu Interlock 3D $X1-X2 \{N\} Y1k-Y2k$ Liage $Wbk \{Bki\}$ – Surface $Ws \{Ci\}$ – Renfort

{Si }

- **X1** : Type d'angle du fil de chaîne de liage, O (orthogonal) ou A (angle).
- **X2** : Type de liage du fil de chaîne dans l'épaisseur du tissu, L (couche à couche) ou T (à travers l'épaisseur).
- **N** : Nombre de fils de trame par couche et par colonne de l'architecture élémentaire du tissu 3D interlock chaîne.
- **Y1k** : égal au pas du fil de liage du groupe k.
- **Y2k** : égal à la profondeur du fil de liage du groupe k.
- **Wbk** : est lié au type d'armure des fils de chaîne de liaison du groupe k.
- **Bki** : contient la numérotation des fils de chaîne de liaison du groupe k avec une position intermédiaire.

Le terme de surface correspond au fil de chaîne tissé en surface et disparaît si le tissage en surface n'est pas considéré.

- **Ws** : est lié au type d'armure des fils de chaîne de surface.
- **Ci** : contient la numérotation des fils de chaîne en surface situés en position inter-couches i.

Le terme renfort correspond aux fils de chaîne de renfort.

- **Si** : représente la numérotation des fils de chaîne de renfort situé en position inter-couches i du tissu.

I.3.3.2. Classification des structures tissées 3D interlocks chaînes

La classification des structures tissées 3D interlocks chaînes dépend de deux paramètres : le premier paramètre est relatif au type d'angle du fil de chaîne de liage à travers de l'épaisseur et le deuxième paramètre correspond à la profondeur à laquelle le fil de chaîne de liage est introduit dans l'épaisseur. La combinaison entre ces deux paramètres permet de distinguer quatre familles principales des structures tissées 3D interlocks chaînes (Figure I.28) [79],[80]:

- **Famille (A/T : interlock d'angle avec liaison des fils de chaîne dans l'épaisseur).**
Dans cette famille, les fils de chaîne de liage sont insérés à travers l'épaisseur avec une direction diagonale.

- **Famille (A/L : interlock d'angle avec liaison des fils de chaîne couche à couche)**
Dans cette famille, les fils de chaîne de liage lient les couches entre elles dans la direction diagonale.
- **Famille (O/T : interlock orthogonal avec liaison des fils de chaîne dans l'épaisseur)**
Dans cette famille, les fils de chaîne de liage lient les couches entre elles dans l'épaisseur de la structure avec un angle d'inclinaison orthogonal.
- **Famille (O/L : interlock orthogonal avec liaison des fils de chaîne couche à couche)**
Dans cette famille, les fils de chaîne de liage lient au moins deux couches entre elles entre deux colonnes de fils de trame.

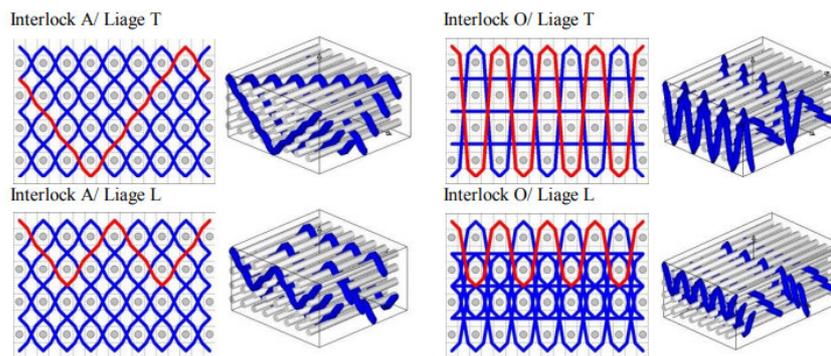


Figure I.28 : Classification des structures tissées 3D interlocks chaînes [107]

Cette classification des structures tissées 3D interlocks chaînes permet de mieux comprendre et analyser les propriétés des différents types d'architectures. Le choix de l'architecture est en fonction des propriétés dépendant du positionnement des différents types de fils au sein de la structure. Les structures tissées 3D interlocks chaînes avec une insertion orthogonale des fils de chaîne de liage conduisent à des structures compactes et rigides comparativement aux structures tissées 3D interlocks chaînes avec une insertion angulaire des fils de chaîne de liage. En ajoutant le type de profondeur, l'insertion des fils de chaîne de liage, les structures 3D interlocks chaînes de type orthogonales avec un liage couche à couche sont moins denses que les structures 3D interlocks chaînes de type orthogonales avec un liage à travers l'épaisseur. Le comportement des différentes classes des structures tissées 3D interlocks chaînes à base des fils de sisal d'origine marocaine sera analysé dans la suite dans cette thèse afin d'évaluer le potentiel de ces fils pour le développement des matériaux composites à base de ces structures 3D multicouches

[82],[83].

I.3.4. Procédé de tissage

I.3.4.1. Procédé de tissage des structures tissées 2D

Le tissage des structures tissées 2D permet de produire un entrecroisement des deux nappes de fils dans le plan. Les fils positionnés dans la direction de production sont appelés les fils de chaîne et les fils positionnés dans la direction perpendiculaire à celle des fils de chaîne sont appelés fils de trame. La nappe des fils de chaîne est réglée en tension pour faciliter les étapes du tissage et plus particulièrement la formation de la foule. Le procédé de tissage est divisé en deux étapes principales (Figure I.29) : la première étape, nommée « la préparation au tissage » qui comprend les différentes démarches suivies pour la préparation des fils au procédé de tissage (Encantrage , ourdissage, rentrage) et la deuxième étape, du tissage associé au procédé de fabrication des structures tissées.

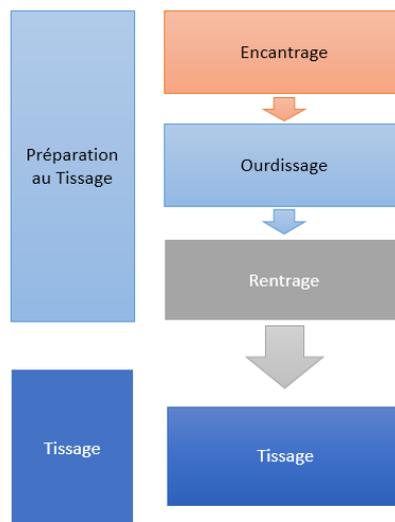


Figure I.29 : Procédé général de tissage

La préparation au tissage comprend trois étapes principales:

- **Étape 1 : L'encantrage** consiste à placer les bobines des fils de chaîne dans un support appelé le cantre (Figure I.30) en vérifiant la qualité des bobines.



Figure I.30 : Représentation d'un cantre de bobines de fils de chaîne

- **Étape 2 : L'ourdissage** permet de transférer les fils des bobines sur une ensouple de tissage. Deux principes d'ourdissage peuvent être utilisés; l'ourdissage direct et l'ourdissage indirect. L'ourdissage direct permet de disposer les fils directement sur les ensouples du tissage à partir des bobines placées sur les cantres comme l'illustre la Figure I.31. L'ourdissage indirect consiste à ourdir les fils de chaîne sur un tambour avant de les transférer sur une ensouple de tissage (Figure I.32).

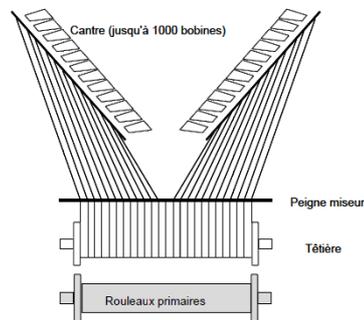


Figure I.31 : Principe de l'ourdissage direct [110]

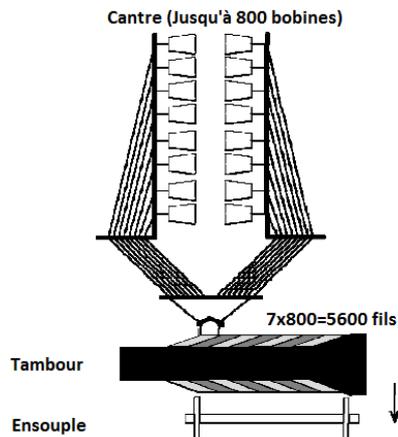


Figure I.32 : Principe de L'ourdissage indirect [110]

- **Étape 3 :** Le rentrage s'effectue après l'installation des ensouples de fils de chaîne sur la machine à tisser. Cette étape consiste à passer individuellement et dans un ordre déterminé tous les fils de chaîne dans les maillons des lisses fixées dans les lames (Figure I.33).

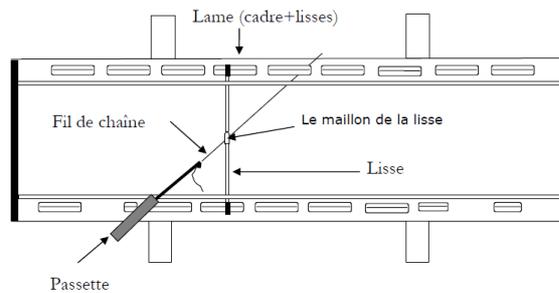


Figure I.33 : Principe de base du rentrage [110]

Après le rentrage, les fils de chaîne sont passés individuellement dans le peigne. Le principe de tissage est basé sur deux opérations comme le présente la Figure I.34. La première opération comprend la sélection des fils de chaîne avec l'ouverture de la foule par un mouvement de montée et de descente des cadres. La deuxième opération est basée sur l'insertion des fils de trame par navette et le tassement des fils de trame par le peigne. La répétition de ces deux opérations permet de former le tissu [111].

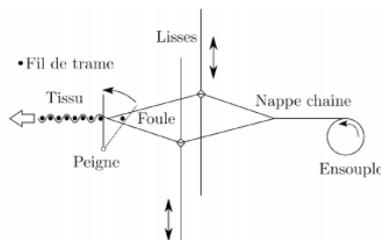


Figure I.34 : Schéma descriptif du procédé de tissage des structures tissées 2D [111]

I.3.4.2. Procédé de tissage des structures tissées 3D interlocks chaînes

Malgré la complexité des structures tissées 3D interlocks chaînes, la fabrication de ces structures peut se faire sur une machine à tisser traditionnelle. La réalisation des structures tissées 3D interlocks chaînes implique une adaptation des cadres de la machine à tisser [112]. Le procédé de tissage est basé sur les mêmes opérations principales du tissage des structures

tissées 2D (section I.3.4.1). La consommation des fils de chaîne varie en fonction du type de fils. Les fils de chaîne de liage sont les fils les plus consommés au cours du tissage par rapport aux autres types de fils [112]. De ce fait, la préparation de plusieurs ensouples de fils de chaîne est nécessaire pour introduire les différents types de fils de chaîne dans la structure 3D (fils de chaîne de liage, fils de chaîne de surface et fils de chaîne de renfort) (Figure I.35). La machine à tisser à plat des structures épaisses a été développée par Boussu et al. [113] et Ying et al. [114].

Lors du tissage, l'évolution des fils de chaîne de liage au sein de la structure est différente des autres types de fils de chaîne. L'insertion des fils de chaîne de liage au sein de la structure assure la stabilité dimensionnelle des structures multicouches, cependant, cette insertion entraîne le frottement entre les fils de chaîne de liage et les fils de trame.

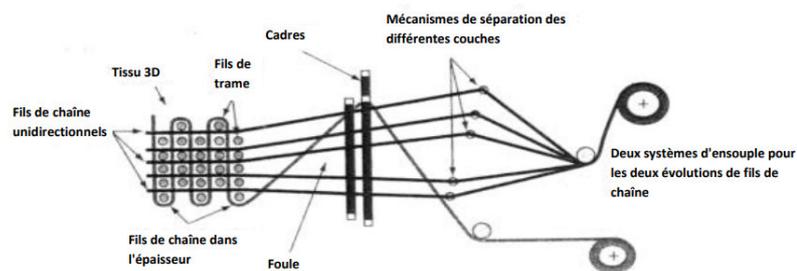


Figure I.35 : Schéma descriptif du procédé de tissage des structures tissées 3D interlocks chaînes [115]

I.3.5. Approche multi-échelle des structures fibreuses tissées

Le choix de la fibre est une étape primordiale pour définir les propriétés mécaniques de la structure finale. L'organisation et l'orientation des fils ou mèches au sein des structures fibreuses se déterminent en fonction des propriétés privilégiées de la structure produite. De ce fait, le choix du type d'architecture est un paramètre important pour assurer la performance mécanique des tissus.

Les structures fibreuses tissées 2D et 3D sont des matériaux textiles avec des architectures poreuses à base de fils imbriqués, ce qui permet de mettre l'accent sur l'aspect multi-échelle de ces structures. L'analyse du comportement des structures tissées 2D et 3D se fait sous différentes échelles (Figure I.36):

- **Échelle Microscopique** : c'est l'échelle de la fibre.
- **Échelle Mésoscopique** : c'est l'échelle du fil.
- **Échelle Macroscopique** : c'est l'échelle du tissu final.

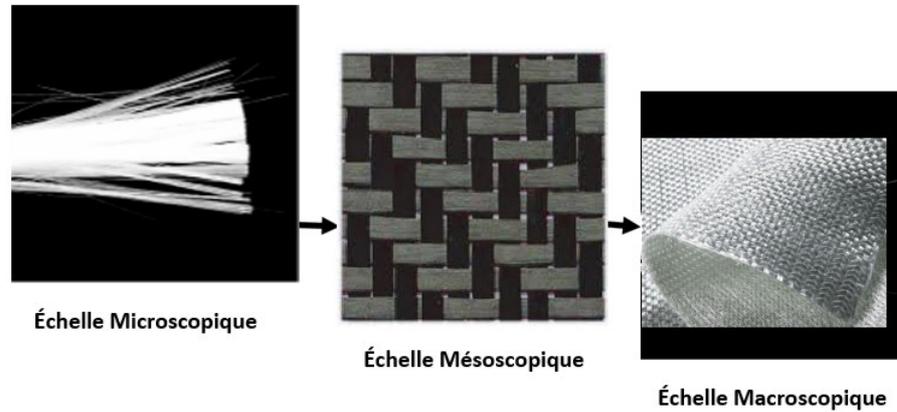


Figure I.36 : Représentation Multi-échelle des structures fibreuses tissées

La structure hétérogène des fibres naturelles pousse à analyser toutes les étapes de sa transformation pour la fabrication des structures fibreuses. L'étude menée par Corbin et al. [116] a montré que la rigidité de la fibre de lin influence sur la tissabilité des mèches et aussi sur les propriétés en traction des renforts à base de cette fibre. Dans la suite des travaux de cette thèse, nous nous intéressons à montrer l'aspect multi-échelle de l'analyse du comportement des structures tissées à base de la fibre de sisal d'origine marocaine.

I.3.5.1. Approche microscopique (Échelle fibre)

À l'échelle microscopique, la structure fibreuse est représentée par la plus petite entité de la structure qui est la fibre. Le comportement à cette échelle correspond au comportement de la fibre. L'analyse des différentes propriétés de la fibre permet sa mise en œuvre dans le procédé de tissage. Les propriétés des différentes fibres naturelles sont détaillées dans les sections I.2.3 et I.2.4. La continuité et la rigidité des fibres naturelles est un paramètre permettant de choisir le procédé de transformation de la fibre à l'échelle mésoscopique.

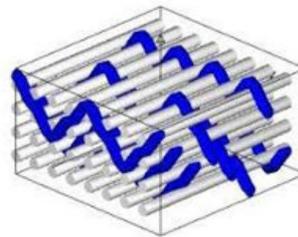
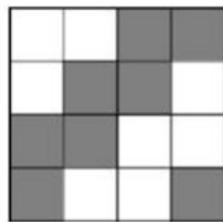
I.3.5.2. Approche mésoscopique (Échelle fil)

À l'échelle mésoscopique, la structure fibreuse est représentée par le fil. Les propriétés physiques (titre, torsion) et mécaniques (ténacité) du fil sont analysées en identifiant les paramètres affectant sa tissabilité. La torsion des fibres pour la fabrication des fils est un

I.État de l'art sur le développement des matériaux composites à base de fibres naturelles

paramètre important pour la continuité et la stabilité dimensionnelle du tissu final. Les propriétés mécaniques du fil sont des caractéristiques influençant sur les propriétés mécaniques des tissus finaux.

L'arrangement des fils décrivant l'architecture de la structure fibreuse est présenté par le motif répétitif (volume élémentaire représentatif : VER). L'orientation et l'entrelacement des fils sous différentes formes pour répondre aux exigences industrielles sont détaillés dans les sections I.3.1, I.3.2 et I.3.3. Plusieurs logiciels de modélisation géométrique des motifs tissés et de CAO tissage (Wisetex, DB Weave, ...) permettent de construire une géométrie réaliste de l'architecture de la structure fibreuse.



A. Exemple de VER des structures tissées 2D B. Exemple de VER des structures tissées 3D

Figure I.37 : Exemples de volume élémentaire représentatif : A. Exemple de VER des structures tissées 2D, B. Exemple de VER des structures tissées 3D

I.3.5.3. Approche macroscopique (Échelle tissu)

À l'échelle macroscopique, la structure fibreuse est considérée dans son ensemble. Les caractéristiques des structures fibreuses sont analysées selon les normes. L'analyse du comportement des structures fibreuses tissées consiste à déterminer les propriétés structurelles et mécaniques.

Les propriétés structurelles des structures fibreuses comprennent :

- **La masse surfacique** : est une caractéristique physique calculée en fonction de la masse et la surface du textile. Elle dépend de la densité des fils de chaîne et de trame dans la structure et du titrage du fil. Elle influence sur le taux de renforcement des matériaux composites à base des structures fibreuses.

I.État de l'art sur le développement des matériaux composites à base de fibres naturelles

- **L'épaisseur** : est une caractéristique physique, qui dépend du type d'armure et du type de fil. Elle influence sur la mise en œuvre des structures fibreuses tissées pour le renforcement des matériaux composites.
- **La densité des fils** : est le nombre de fils par unité de longueur dans la direction chaîne et trame.
- **L'embuvage et le retrait** : représentent la longueur consommée des fils de chaîne (embuvage) et des fils de trame (retrait) au sein de la structure fibreuse. Cette caractéristique définit la capacité de la structure à s'allonger hors déformation élastique.

Les propriétés mécaniques des structures fibreuses comprennent:

- **Le comportement en traction** : représente la rigidité des structures fibreuses. L'analyse de ce comportement permet d'évaluer les propriétés force-allongement des structures fibreuses dans les deux directions (chaîne et trame).
- **Le comportement en flexion** : représente la rigidité en flexion des structures fibreuses tissées. Ce comportement dépend du mouvement possible entre les fibres au sein des fils et entre fils au sein des structures.
- **Le comportement en compression** : La réalisation des matériaux composites entraîne la compression des structures fibreuses. Cette compression influence la qualité de l'imprégnation.

La structure hétérogène des fibres naturelles pousse à analyser toutes les étapes de sa transformation pour la fabrication des structures fibreuses. L'étude menée par Corbin et al. [116] a montré que la rigidité de la fibre de lin influence sur la tissabilité des mèches et aussi sur les propriétés en traction des renforts à base de cette fibre. Dans la suite des travaux de cette thèse, nous nous intéressons à montrer l'aspect multi-échelle de l'analyse du comportement des structures tissées à base de la fibre de sisal d'origine marocaine.

I.3.5.4. Influence du procédé de fabrication sur la performance des fils

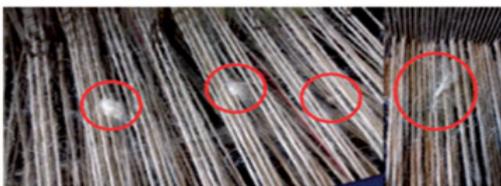
Lors du procédé de tissage des structures fibreuses, les fils sont soumis à de nombreuses

I.État de l'art sur le développement des matériaux composites à base de fibres naturelles

sollicitations associées aux différentes étapes (préparation des ensouples, rentrage et tassage des fils...). Ces sollicitations peuvent entraîner la modification du comportement mécanique des fils. L'influence du tissage des structures fibreuses 2D à base des fils de lin sur les propriétés en traction a été étudiée par F. Omrani et al.[117]. Le tissage de l'armure sergé 2/2 engendre la diminution de la rigidité des fils de lin et l'augmentation de l'allongement à rupture en fonction du niveau de torsion des fils. Une forte valeur de torsion des fils réduit la dégradation des fils lors du procédé de tissage [117].

L'intérêt porté sur les structures tissées 3D a contribué à analyser l'influence du procédé de tissage sur la performance mécanique des fils [4], [118], [119]. Le type d'architecture des structures tissées 3D interlocks chaines influence le degré d'endommagement des fils. Les fils de chaîne de liage représentent les fils soumis à de fortes sollicitations par rapport aux autres types de fils (fils de chaîne de renfort, fils de chaîne de surface, fils de trame). Les fils de chaîne de liage insérés à travers l'épaisseur sont fortement endommagés contrairement aux fils de chaîne de liage insérés entre les couches. Les fils de trame sont légèrement influencés par le procédé de tissage des structures 3D. La torsion des fils de chaîne et de trame peut être utilisée pour protéger les fils durant le tissage [93],[95].

Le procédé de tissage des structures tissées 3D interlocks chaines permet d'insérer les fils de chaîne à travers l'épaisseur, ce qui implique la frisure des fils au sein de ces structures contrairement aux structures tissées 2D. Le frottement des fils entre eux entraîne l'augmentation de la friction interfibre des fils, cela conduit à former des paquets de fibrilles à la surface des fils, illustrés sur la Figure I.38. Ce défaut observé à la surface des fils peut causer la rupture des fils. Plusieurs paramètres peuvent être optimisés pour minimiser la dégradation des fils durant le tissage comme la tension des fils de chaîne, la vitesse d'insertion des fils de trame et la torsion des fils [74],[95],[96].



A. Dégradation des fils de lin



B. Dégradation des fils de kevlar

Figure I.38 : Dégradation des fils durant le tissage des structures 3D interlocks chaînes : A. Dégradation des fils de lin, B. Dégradation des fils de kevlar [74],[96]

I.4. Réalisation des matériaux composites à base des fibres naturelles

Les matériaux composites sont des matériaux hétérogènes issus de la combinaison de deux matériaux avec des propriétés différentes (Figure I.39). Les avantages à l'utilisation des matériaux composites dans les différents secteurs industriels découlent de la performance versus poids en comparaison avec les matériaux classiques (métaux...)[121].

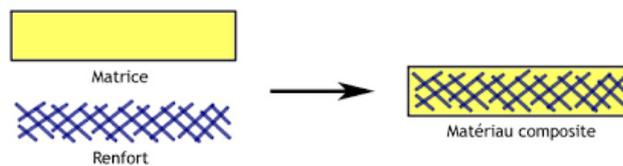


Figure I.39 : Composition des matériaux composites

Les composants des matériaux composites représentent deux phases (renfort et matrice) chaque phase assure un rôle différent au sein du matériau composite.

- **Le renfort** assure les propriétés mécaniques des matériaux composites. Il peut être constitué de fibres classées selon leur nature (synthétique, naturelle), leur longueur (courte, longue) et leur arrangement. Les différents types de renforts fibreux sont décrites dans la section I.3.
- **La matrice** est une résine polymère permettant de protéger le renfort de l'environnement et transmettre les sollicitations mécaniques au renfort. Elle est distinguée selon sa nature (matrice organique, minérale). La matrice organique est le type de matrice le plus utilisé dans le développement des matériaux composites. Ce type de matrice est divisé en deux familles :
 - **La résine thermodurcissable** est une résine irréversible et non fusible après polymérisation. Les qualités bénéfiques de cette résine comprennent : l'excellente adhérence, la stabilité thermique et la résistance à la chaleur. Elle est utilisée dans les procédés de mise en œuvre

I.État de l'art sur le développement des matériaux composites à base de fibres naturelles

comme le moulage par infusion, le moulage par contact. L'irréversibilité de la résine rend le recyclage des composites thermodurcissables difficile.

- **La résine thermoplastique** est une résine réversible, soluble et fusible après polymérisation. Elle se présente souvent sous forme rigide, ce qui nécessite le chauffage de cette résine lors de l'imprégnation du renfort. Elle se caractérise par une meilleure résistance aux chocs et un faible coût.

Dans les travaux de cette thèse, nous nous intéresserons principalement aux matériaux composites à base de renfort fibreux naturelles et de matrice organique.

I.4.1. Mise en œuvre des matériaux composites à base des fibres naturelles

Le procédé de mise en œuvre des matériaux composites dépend du type de matrice utilisée et du domaine d'application. De ce fait, les techniques d'élaboration des matériaux composites sont similaires pour les renforts fibreux issus des ressources naturelles et pétrolières. Suite aux exigences industrielles, plusieurs techniques d'élaboration ont été développées et classifiées selon la forme finale du composite et le déroulement opératoire (Figure I.40)[122].

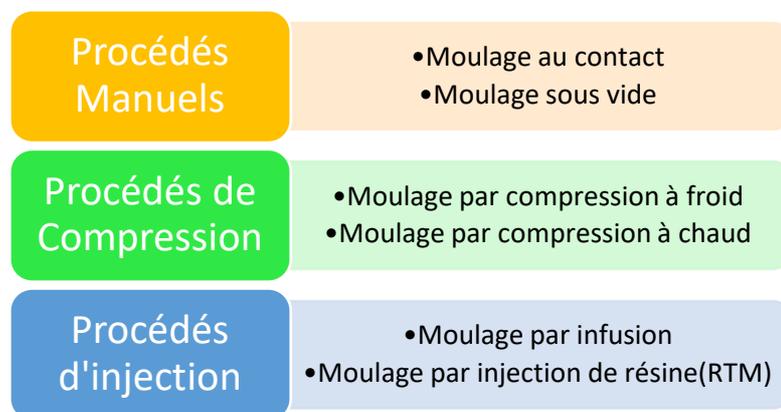


Figure I.40 : Classification des procédés de mise en œuvre des matériaux composites [122]

Le procédé d'élaboration des matériaux composites est l'un des facteurs principaux influençant la performance mécanique des matériaux composites. Le choix du procédé d'élaboration dépend du choix des différents constituants (renfort et matrice) du matériau composite. L'utilisation des fibres naturelles comme renfort, présente des avantages liés à une démarche d'écoconception. Cependant, le choix de ces fibres présente des inconvénients non

I.État de l'art sur le développement des matériaux composites à base de fibres naturelles

négligeables tels que faible tenue thermique, forte perméabilité à l'eau...[123].

Les principaux paramètres influençant la réalisation des matériaux composites à base des fibres naturelles sont le taux d'humidité et la tenue thermique des fibres naturelles. La nature hydrophile des fibres naturelles permet de limiter la compatibilité avec la matrice polymère. De ce fait, plusieurs procédures de modification des fibres naturelles sont proposées pour améliorer l'adhésion entre les fibres naturelles et la matrice telle que : traitement chimique (alcalin...), traitement physique... [103],[104].

Les procédés d'élaboration des matériaux composites à base des fibres naturelles sont généralement le moulage par compression, moulage par injection et moulage par infusion. Les propriétés mécaniques des matériaux composites varient en fonction du mode opératoire de chaque procédé d'élaboration [103],[104]. Sreekumar et al.[125] ont fabriqué des matériaux composites à base des fibres de sisal et de résine polyester en utilisant le moulage par compression et le moulage par injection de résine (RTM). Les propriétés mécaniques des matériaux composites fabriqués par le moulage (RTM) sont supérieures aux propriétés mécaniques des matériaux composites fabriqués par le moulage par compression. Cette différence de performance est justifiée par la mauvaise adhésion entre les fibres de sisal et la résine polyester des matériaux composites fabriqués par le moulage par compression [125]. L'arrangement et l'orientation des fibres influencent le choix du procédé d'élaboration. Le moulage par compression convient aux structures fibreuses plates, tandis que le moulage par injection de résine [126]–[128] et par infusion convient pour les différents types de structures fibreuses [104],[105].

I.4.2. Caractérisation des matériaux composites à base des fibres naturelles

L'incorporation des fibres naturelles dans les matériaux composites en remplaçant les fibres synthétiques permet de répondre aux enjeux environnementaux mondiaux. De ce fait, l'évaluation du potentiel des fibres naturelles pour le renforcement des matériaux composites a été étudié en comparaison avec le potentiel des fibres synthétiques [107],[109],[110]. Wambua et al.[130] ont testé les propriétés en traction et en flexion des matériaux composites à base du polypropylène et des fibres naturelles (fibre de sisal, fibre de kéraf, fibre de jute, fibre de chanvre, fibre de coco) en comparaison avec les propriétés mécaniques des matériaux composites à base de fibre de polypropylène et de fibres de verre. La fibre de sisal et la fibre de chanvre sont les fibres recommandées pour le remplacement de la fibre de verre pour le

I.État de l'art sur le développement des matériaux composites à base de fibres naturelles

développement des matériaux composites à base du polypropylène pour les applications exigeant une capacité de charge moyenne [130].

La performance des matériaux composites à base des fibres naturelles dépend de plusieurs facteurs notamment la composition chimique de la fibre, l'orientation et l'arrangement de la fibre, les propriétés mécaniques et physiques de la fibre [131]. La composition chimique des fibres naturelles influence l'adhésion entre la fibre et la matrice. La cellulose et la lignine sont les principaux composants des fibres naturelles assurant la résistance mécanique et la stabilité thermique respectivement [132]. L'amélioration de la teneur en cellulose des fibres naturelles est faite via des traitements de surface des fibres naturelles. Alvarez et al. [133] ont démontré que le traitement alcalin de la surface de la fibre de sisal conduit à une amélioration de l'adhésion entre la fibre de sisal et la matrice biosourcée Mater Bi-Y. La surface interfaciale entre le renfort et la matrice Mater Bi-Y a été observée par le microscope à balayage électronique en montrant l'amélioration de l'adhésion entre le renfort et la fibre par le traitement chimique de la fibre de sisal [133].

Alavudeen et al. [134] ont étudié l'influence de l'arrangement et l'orientation de la fibre de kénaf et la fibre de banane sur les propriétés des matériaux composites imprégnés de résine polyester. Les renforts tissés à base de la fibre de kénaf et de banane ont les meilleures propriétés en traction et en flexion en comparaison avec les propriétés des renforts à fibres courtes à orientation aléatoires à base de fibres de kénaf et de banane [134]. La nature discontinue des fibres naturelles conduit à la préparation des fils continus pour la réalisation des renforts tissés. La torsion des fils fait partie des paramètres influençant sur la ténacité des fils après le procédé de tissage. Bledzki et al. [45] ont étudié les propriétés en traction de matériaux composites à base de résine époxy et de tissus de jute avec un taux de renforcement de 32 %. La torsion des fils de jute permet de garantir la cohésion du fil et protéger les propriétés mécaniques des fils lors du procédé de tissage [45].

Les renforts tissés à base des fibres naturelles appliqués dans les applications structurelles telles qu'aéronautique, automobile ... se présentent sous forme tridimensionnelle. Ces structures fibreuses 3D offrent une résistance au délaminage exceptionnelle par rapport aux structures fibreuses 2D. Zhou et al. [135] ont étudié des matériaux composites en poly(acide

I.État de l'art sur le développement des matériaux composites à base de fibres naturelles

lactique) (PLA) renforcés par des tissus 3D en ramie fabriqués en utilisant des fils co-enroulés ramie/PLA. Les meilleures propriétés en traction des matériaux composites en poly(acide lactique) (PLA) renforcés par des tissus 3D en ramie dépend de la meilleure teneur en poids de PLA en raison d'une meilleure imprégnation de la résine [135].

I.4.3. Domaines d'application des matériaux composites à base des fibres naturelles

Les applications des matériaux composites à base des fibres naturelles augmentent et gagnent en popularité par rapport aux fibres synthétiques en raison de leur caractère renouvelable et leur ratio performance/coût. Les principaux domaines d'application de ces matériaux composites : le transport, l'ameublement et le loisir.

I.4.3.1. Application dans le domaine du Transport

Grâce à la légèreté et à la rigidité des matériaux composites à base des fibres naturelles, ces matériaux commencent à se positionner sur l'industrie automobile et aéronautique en forte croissance. Les matériaux composites à base des fibres naturelles sont utilisés pour la préparation des composants internes des véhicules et des avions (Figure I.41) [116],[117]. La demande d'intégration de pièces automobiles légères, pour réduire la consommation de carburant et donc les émissions de gaz à effet de serre, continuera à stimuler la recherche sur la faisabilité des composites à base de fibres naturelles dans les véhicules automobiles.

Selon l'ABRACOCO (Association brésilienne de l'agro-industrie de la noix de coco), les matériaux composites à base de la fibre de noix de coco offrent divers avantages par rapport à la mousse de polyuréthane, à savoir un plus grand confort du conducteur (dans les sièges de véhicules), une excellente aération et la biodégradabilité [137]. Selon le professeur Heinrich Flegel, directeur de la technologie de production au centre de recherche de DaimlerChrysler à Ulm, en Allemagne, l'utilisation de fibres naturelles a permis de réduire le poids de 10 % et de diminuer de 80 % l'énergie nécessaire à la production de ces unités, le coût du composant étant inférieur de 5 % à celui des composants comparables renforcés de fibres de verre [138].



Figure I.41 : Exemple d'application des matériaux composites à base des fibres naturelles dans l'automobile [138]

I.4.3.2. Application dans le domaine de l'Ameublement

L'adaptation des matériaux composites aux formes complexes permet d'utiliser ces matériaux dans l'ameublement et le design. Le mobilier design à base des matériaux composites présente une meilleure résistance mécanique et une résistance aux intempéries. Pil et al. [139] ont présenté quelques exemples de chaises fabriquées à partir des matériaux composites à base des fibres de lin et de résine polymère d'acide polylactique (Figure I.42). L'ameublement à base des matériaux composites est un mobilier à double usage IN/OUT.



Figure I.42 : Exemples d'ameublement à base des matériaux composites [139]

I.4.3.3. Application dans le domaine du Loisir

Les matériaux composites à base des fibres naturelles peuvent être également utilisés dans la fabrication des instruments de musique et des équipements sportifs. Le fabricant californien d'instruments Blackbid a fabriqué des instruments, illustrés dans la Figure I.43, à partir de matériaux composites renforcés de fibres de lin. Ces matériaux composites ont assuré une qualité exceptionnelle et une légèreté [139]. La planche du surf (Figure I.44) est parmi les équipements sportifs fabriqués à partir des matériaux composites renforcés par les fibres de lin.



Figure I.43 : Exemple d'instrument de musique à base des matériaux composites [139]



Figure I.44 : Planche de surf à base des matériaux composites [139]

I.5. Conclusion

Les fibres naturelles sont de plus en plus demandées dans l'industrie des matériaux composites pour répondre aux préoccupations environnementales mondiales. Les avantages des fibres naturelles, tels que faible densité et biodégradabilité, conduisent à remplacer les fibres synthétiques pour le renforcement des matériaux composites.

La plante d'Agave Sisalana est une plante abondante dans les quatre continents, mais elle n'est pas exploitée industriellement dans les pays en cours de développement. La fibre de sisal d'origine marocaine est utilisée seulement dans la médecine traditionnelle et l'artisanat. Les propriétés des fibres naturelles dépendent des conditions de culture, de récolte de la plante et du procédé d'extraction de ces fibres. La teneur en cellulose et l'angle microfibrille des fibres

I.État de l'art sur le développement des matériaux composites à base de fibres naturelles

naturelles sont des paramètres importants pour l'évaluation des propriétés mécaniques des fibres. La stabilité thermique des fibres naturelles dépend du taux d'hémicellulose dans la structure des fibres. La nature discontinue des fibres naturelles exige un procédé de transformation de ces fibres en forme continue pour le renforcement des matériaux composites. La torsion est un paramètre essentiel pour garantir la tissabilité des fibres naturelles.

Les structures fibreuses tissées sont parmi les structures de renfort les plus souvent utilisées dans l'industrie des matériaux composites. Le procédé de tissage permet une facilité de mise en œuvre des renforts fibreux. Les propriétés des structures fibreuses tissées bidirectionnelles dépendent du type d'armure et du type de fibre naturelle. L'intérêt porté sur les structures fibreuses multicouches pour le renforcement des matériaux composites utilisés dans les applications structurales a poussé les chercheurs à concevoir les structures fibreuses tissées tridirectionnelles. Le procédé de tissage des structures tissées 3D interlocks chaînes est similaire au procédé des structures tissées 2D. La complexité des structures fibreuses tissées conduit à adopter une approche multi échelle pour caractériser ces structures. Les propriétés au niveau de chaque échelle influencent sur le comportement de la structure finale.

Nos travaux portent sur la valorisation de la fibre de sisal d'origine marocaine pour le renforcement des matériaux composites. Notre objectif est d'étudier les différentes étapes influençant la performance des renforts fibreux de la préparation de la fibre jusqu'à la réalisation des matériaux composites.

II. Étude des structures fibreuses de sisal aux échelles fibre et fil

II.1. Introduction

La complexité des structures fibreuses réside dans l'aspect multi échelle de ces structures. L'étude de chaque constituant des structures fibreuses de la fibre en passant par le fil jusqu'à la structure finale permet de décrire et de comprendre correctement le comportement des structures fibreuses. L'analyse des propriétés des fibres naturelles est une étape primordiale pour évaluer la performance de ces fibres par rapport aux fibres synthétiques et identifier leurs limitations, comme expliqué dans le chapitre précédent. La tissabilité des fibres naturelles dépend de la transformation des fibres naturelles en fils continus et des propriétés des fils obtenus.

Dans un premier temps, ce chapitre s'intéressera à l'étude des différentes propriétés (morphologiques, chimiques, thermiques et mécaniques) de la fibre de sisal extraite du fil de sisal commercialisé dans le marché marocain. Puis, les fils à base de fibres de sisal seront étudiés en identifiant leurs propriétés morphologiques, physiques et mécaniques. Enfin, l'impact du procédé de tissage des fils de sisal sur leurs propriétés sera étudié aux échelles fibres et fils.

II.2. Étude des structures fibreuses à l'échelle fibre (approche microscopique)

II.2.1. Fibre de sisal d'origine marocaine

La fibre de sisal (Figure II.1) est parmi les ressources naturelles abondantes au Maroc, mais son exploitation est limitée seulement dans l'artisanat et la médecine traditionnelle. La fibre de sisal est une fibre extraite mécaniquement d'une plante de la famille des Agavacées (Plante *Agave sisalana*). Les différentes propriétés de la fibre de sisal permettent de déterminer les caractéristiques de la fibre de sisal (propriétés morphologiques, thermiques, physiques, chimiques et mécaniques).

II. Étude des structures fibreuses de sisal aux échelles fibre et fil



Figure II.1 : Fibre de sisal

II.2.2. Propriétés morphologiques de la fibre de sisal

Les propriétés morphologiques de la fibre de sisal sont associées à leurs caractéristiques géométriques (longueur, diamètre) et les aspects de surface de la fibre de sisal.

II.2.2.1. Longueur et diamètre

II.2.2.1.1. Longueur

La longueur de la fibre de sisal est une caractéristique permettant de décrire la dimension de la fibre sur le plan morphologique. La structure de la fibre de sisal en tant que fibre végétale est similaire à la structure d'un matériau composite. Cette similarité de structure exige une manipulation minutieuse de la fibre de sisal.

La longueur de la fibre de sisal est mesurée sur un maillemètre (Figure II.2). La mesure de la longueur de la fibre consiste à maintenir la fibre entre deux pinces et à appliquer à une tension constante exercée par le poids du chariot. La mesure est effectuée sur un lot de 100 fibres [140]. La longueur moyenne de la fibre de sisal d'origine marocaine est de $56,64 \pm 10,23$ mm (Tableau II-1). Le Tableau II-1 montre la variabilité de la longueur de la fibre de sisal en fonction des lieux de plantation.



Figure II.2: Maillemètre pour la mesure de la longueur de la fibre de sisal

II. Étude des structures fibreuses de sisal aux échelles fibre et fil

Tableau II-1 : Longueur de la fibre de sisal selon l'origine

Fibre	Longueur moyenne (mm)	Origine
Fibre de sisal	56,64±10,23	Maroc[141]
	50	Inde [141]
	30	Kenya [48]

L'étude de la distribution et la dispersion de la longueur de la fibre de sisal est une analyse importante pour évaluer la qualité de la fibre. La Figure II.3 montre la dispersion significative de la longueur de la fibre de sisal. Cette dispersion est due à plusieurs facteurs tels que : le positionnement de la fibre au sein de la plante, le procédé d'extraction, les conditions climatiques ...[140].

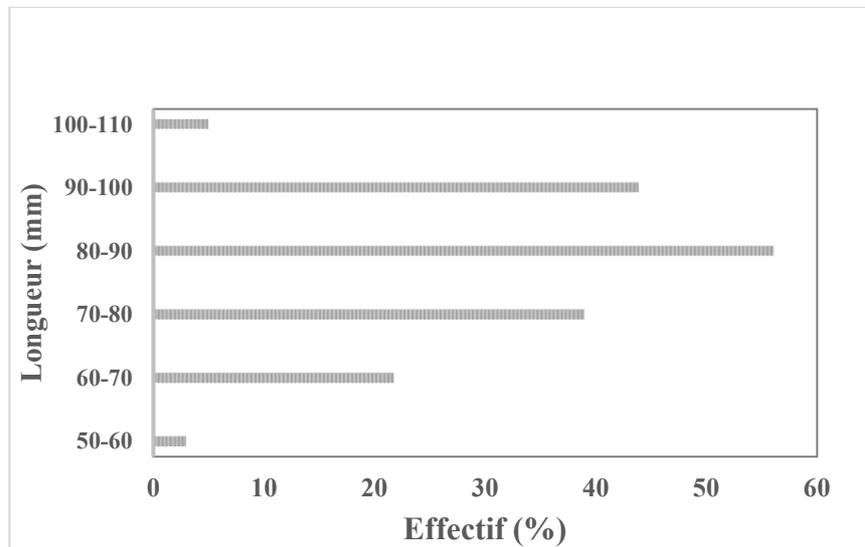


Figure II.3: Distribution de la longueur de la fibre de sisal d'origine marocaine

II.2.2.1.2. Diamètre

Le diamètre de la fibre de sisal est une caractéristique importante pour décrire la morphologie de la fibre et identifier les défauts de la structure de la fibre affectant les propriétés mécaniques. La mesure du diamètre de la fibre de sisal est effectuée à l'aide d'un microscope optique Olympus BX15 (voir Figure II.4). Le diamètre moyen de la fibre de sisal est de $239,0 \pm 80,2 \mu\text{m}$. La mesure du diamètre de la fibre a été effectuée sur cent fibres. Cette caractéristique a été mesurée sur sept emplacements de chaque fibre. Le diamètre de la fibre de sisal n'est pas constant tout au long de la fibre. Cette variation du diamètre dépend de l'organisation complexe

II. Étude des structures fibreuses de sisal aux échelles fibre et fil

de la section de la fibre de sisal. Le diamètre de la fibre de sisal d'origine marocaine est faible en comparaison avec celui de la fibre de sisal d'origine indienne (Tableau II-2).

Tandis que, la fibre de sisal d'origine brésilienne présente moyen de défaut que la fibre de sisal d'origine marocaine [55]. La faible valeur du diamètre de la fibre de sisal d'origine marocaine dépend des conditions climatiques qui influent sur la croissance de la plante. La variation du diamètre de la fibre de sisal est un indicateur affectant les propriétés mécaniques de la fibre. Le diamètre de la fibre de sisal est irrégulier, contrairement à celui des fibres synthétiques telles que la fibre de verre [142].

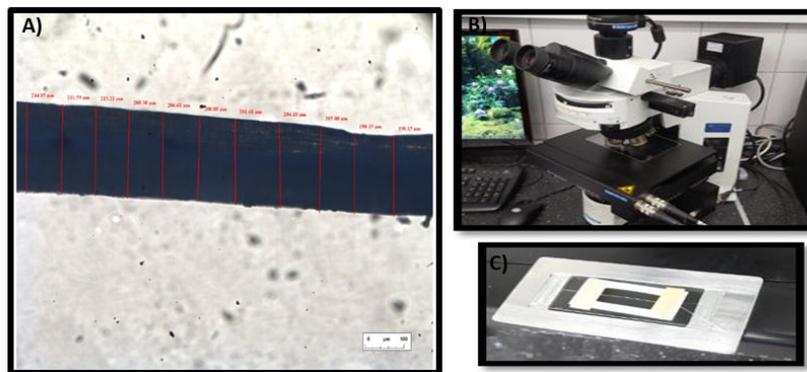


Figure II.4: Mesure du diamètre par un microscope optique : A)-Observation optique de la fibre de sisal , B)-Microscope optique Olympus BX15 , C)-Échantillon de la fibre de sisal observé au microscope

Tableau II-2: Diamètre de la fibre de sisal selon l'origine

Fibre	Diamètre (μm)		Origine
	Valeur Moyenne	Intervalle	
Fibre de sisal	$239,0 \pm 80,18$	121,6–411,0	Maroc[142]
	$200,0 \pm 75,6$	-	Brésil[54]
	$269,8 \pm 78,0$	-	Inde[143]

La Figure II.5 montre la dispersion significative du diamètre de la fibre de sisal. Cette dispersion dépend des mêmes facteurs qui influent sur la dispersion de la longueur de la fibre de sisal (le positionnement de la fibre au sein de la plante, le procédé d'extraction, les conditions climatiques ...)[140].

II. Étude des structures fibreuses de sisal aux échelles fibre et fil

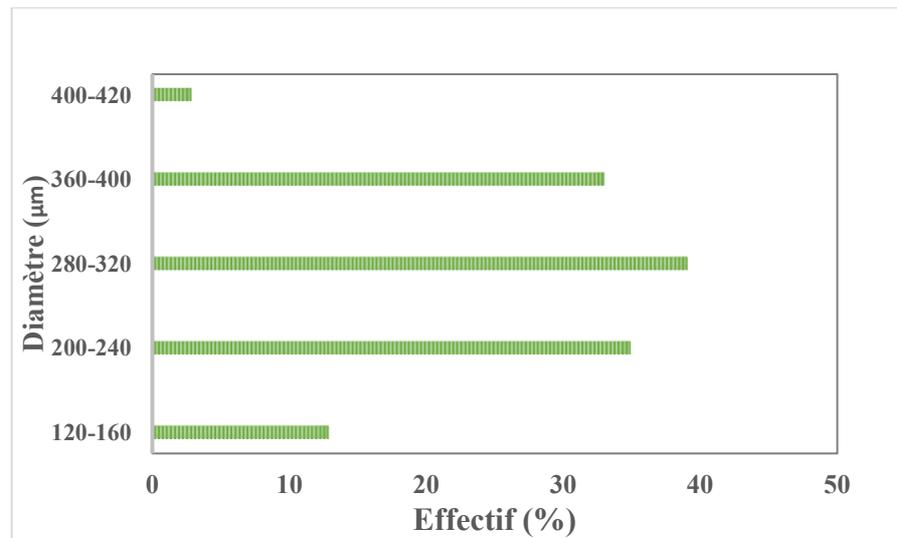


Figure II.5: Distribution du diamètre de la fibre de sisal d'origine marocaine

II.2.2.2. Observation de la surface au microscope à balayage électronique (MEB)

La surface des fibres naturelles peut être analysée en utilisant le microscope à balayage électronique. Cette technique permet de connaître la morphologie de la surface de la fibre.

La surface de la fibre de sisal est étudiée en utilisant le microscope à balayage électronique JEOL JSM 6380LA [142], [144]. Les échantillons de fibre sont métallisés en couvrant la surface par une couche d'or pour les rendre conducteurs. L'observation de la coupe longitudinale de la fibre de sisal montre la surface lisse de la fibre. La structure de la surface extérieure de la fibre de sisal est due à la présence des cires et de matières gommeuses. La morphologie de la surface de la fibre de sisal est similaire à la morphologie de la surface des fibres végétales [142], [145].

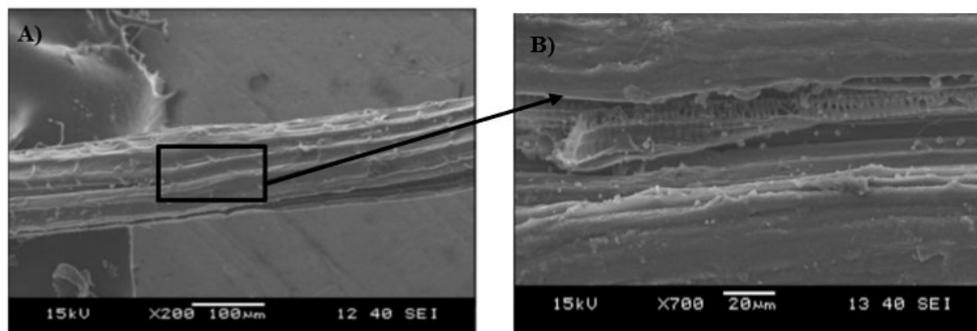


Figure II.6: A) -Observation en coupe longitudinale au MEB de la surface de la fibre de sisal , B)- son agrandissement ($\times 700$)

II.2.3. Propriétés physiques de la fibre de sisal

La paroi cellulaire de la fibre de sisal assure les propriétés physiques de la fibre telles que : la densité et le taux d'absorption d'eau.

II.2.3.1. Densité

La densité est une caractéristique importante des fibres naturelles utilisées en tant que renfort au sein des matériaux composites. La densité des fibres naturelles représente le rapport de la masse sur le volume des fibres naturelles. La méthode recommandée pour la mesure du volume des fibres naturelles avec précision est l'utilisation d'un pycnomètre à gaz, comme évoqué dans le chapitre précédent (section I.2.3.3).

La densité de la fibre de sisal est mesurée en utilisant le pycnomètre à hélium ACCUPYC 1330 et la balance analytique Sartorius Practum 213-1s. La mesure du volume se base sur la détermination du volume de la fibre, en injectant l'hélium avec une pression (P_1) donnée dans la cellule de référence du pycnomètre. Ensuite, la pression du gaz dans cette cellule (P_2) est mesurée et le gaz est détendu dans la cellule contenant l'échantillon de la fibre. Le volume de l'échantillon de la fibre est calculé selon la loi de Mariotte [42]:

$$\text{Avec : } V_1 = V_c - V_e \quad (P_1 - P_{at}) \cdot V_1 = (P_2 - P_{at}) \cdot V_2 \quad (\text{II.1})$$

$$\text{Soit : } V_e = V_c - \frac{(P_2 - P_{at}) \cdot V_2}{(P_1 - P_{at})} \quad (\text{II.2})$$

Avec :

P_1 : correspond à la pression du gaz dans la cellule de référence;

P_2 : correspond à la pression du gaz après détente dans la cellule contenant l'échantillon;

P_{at} : correspond à la pression atmosphérique;

V_1 : correspond au volume du gaz dans la cellule de référence;

V_2 : correspond au volume du gaz après détente dans la cellule contenant l'échantillon;

V_c : correspond au volume de la cellule;

V_e : correspond au volume de l'échantillon.

Après la mesure de la masse des fibres de sisal, le volume d'une masse de fibres de 0,2 g est

II. Étude des structures fibreuses de sisal aux échelles fibre et fil

mesuré à l'aide d'un pycnomètre à hélium. Quinze échantillons sont testés pour la mesure de la densité de la fibre de sisal. La densité moyenne de la fibre de sisal d'origine marocaine est de $1,45 \pm 0,14 \text{ g/cm}^3$. Le lieu de plantation de la fibre de sisal influence la morphologie et la composition de la fibre (Tableau II-3). La faible densité de la fibre de sisal d'origine marocaine permet de réaliser des matériaux composites avec un poids plus réduit que ceux élaborés à partir de fibres synthétiques (la densité des fibres synthétiques varie entre 1,8 et $2,54 \text{ g/cm}^3$) [19].

Tableau II-3: Densité de la fibre de sisal selon l'origine

Fibre	Densité (g/cm^3)	Origine
Fibre de sisal	$1,45 \pm 0,14$	Maroc
	1,42	Inde [143]
	1,45	Brésil [51]

II.2.3.2. Capacité d'absorption d'eau

La présence de la cellulose, la pectine et l'hémicellulose dans la structure de la fibre de sisal favorisent la sensibilité à l'eau en attribuant un caractère hydrophile à la fibre de sisal. Ce caractère est un facteur important pour connaître l'effet de l'eau sur la structure de la fibre de sisal.

Le taux d'absorption de la fibre de sisal est défini en utilisant la méthode gravimétrique. Un échantillon de 100 g de fibres de sisal a été séché à $60 \text{ }^\circ\text{C}$ pendant 12 heures, jusqu'à ce qu'une masse constante soit atteinte. Ensuite, l'échantillon a été immergé dans un volume d'eau distillée à température ambiante. Puis, l'échantillon a été essuyé et pesé toutes les 15 min jusqu'à ce que la masse se stabilise à nouveau. Le taux d'absorption d'eau de la fibre de sisal au temps est exprimé par l'équation suivante :

$$M_e = \frac{m_t - m_0}{m_0} \times 100 (\%) \quad (\text{II.3})$$

Avec :

M_e est le taux d'absorption d'eau à l'instant t , m_0 est la masse de l'échantillon à $t=0$ et m_t est la masse de l'échantillon à l'instant t .

La capacité de diffusion de la molécule d'eau dans la fibre de sisal est décrite par un modèle de diffusion de l'eau selon la loi de Fick [146]. Ce modèle permet de décrire la fibre comme un

II. Étude des structures fibreuses de sisal aux échelles fibre et fil

matériau sphérique (section I.2.3.1)[146], [147]. Le coefficient de diffusion (D) représentant la vitesse de diffusion de l'eau au sein de la fibre est calculé par l'équation II.4 :

$$D = \frac{\pi}{16} \left(\frac{b}{M_e} \right)^2 \times \left(\frac{M_2 - M_1}{\sqrt{t_2} - \sqrt{t_1}} \right)^2 \quad (\text{II.4})$$

Avec :

D est le coefficient de diffusion ($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$), b est le diamètre de la fibre, M_e est le taux d'absorption de l'eau, M_1 est la teneur en eau à t_1 et M_2 est la teneur en eau à t_2 .

Le coefficient de perméabilité (P) exprime la perméabilité des molécules d'eau à travers la structure intérieure de la fibre. Ce coefficient est calculé par l'équation II.5 [148]:

$$P = D \times S \quad (\text{II.5})$$

Sachant que :

$$S = \frac{m_f}{m_i}$$

Avec :

P est le coefficient de perméabilité ($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$), S est le coefficient de sorption (g/g), m_f est la masse de l'eau absorbée à l'équilibre et m_i est la masse initiale de l'échantillon à l'état anhydre.

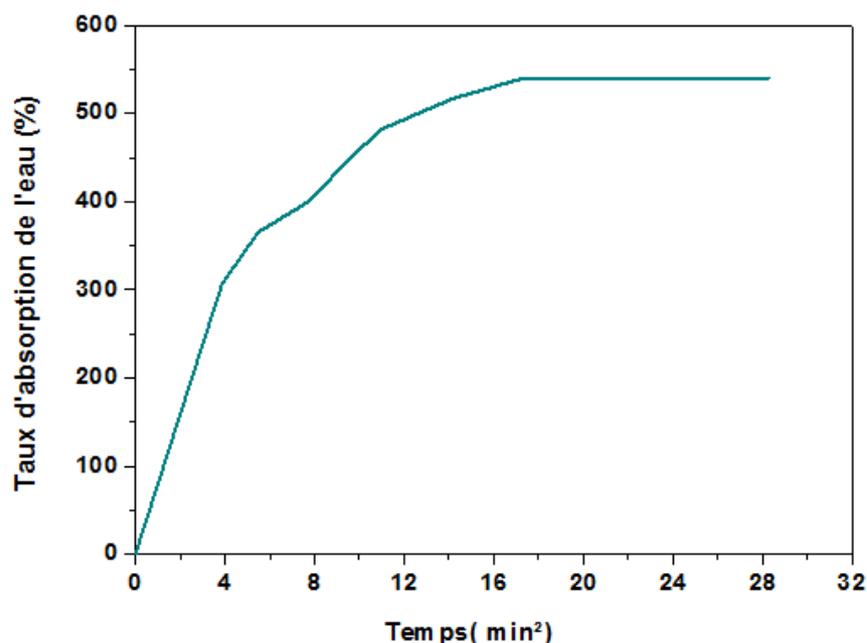


Figure II.7: Évolution de l'absorption de l'eau par la fibre de sisal

II. Étude des structures fibreuses de sisal aux échelles fibre et fil

La Figure II.8 illustre l'évolution du taux d'absorption d'eau par la fibre de sisal. Le taux d'absorption d'eau de la fibre de sisal atteint 543%. La fibre de sisal est moins sensible à l'eau que la fibre d'alfa avec un taux d'absorption d'eau de 640% [42]. L'absorption de l'eau par la fibre de sisal passe par deux phases : la première phase correspond à l'absorption de l'eau par capillarité en raison de la structure poreuse de la fibre; cette phase est représentée par la partie linéaire de la courbe d'absorption. La deuxième phase est caractérisée par la partie concave de la courbe expliquée par le changement de la structure interne de la fibre due au gonflement de la fibre de sisal [148].

Le coefficient de diffusion (D) de la fibre de sisal est de $4,42 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. La différence de capacité d'absorption d'eau entre les différentes fibres végétales, donnée dans le Tableau II-4, est due à la composition chimique de chaque fibre résultant des conditions de culture.

Tableau II-4: Coefficient de diffusion et de perméabilité des fibres végétales dans l'eau distillée

Fibre	Coefficient de diffusion D ($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) $\times 10^{-6}$	Coefficient de perméabilité S ($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) $\times 10^{-5}$	Origine
Fibre de sisal	4,42±0,24	2,03±0,58	Maroc
Fibre de chanvre	5,6	-	Vietnam[148]
Fibre de coco	3,0	-	Vietnam[148]

II.2.3.3. Taux de reprise d'humidité

Le taux de reprise d'humidité de la fibre de sisal est une caractéristique importante pour comprendre l'interaction entre la fibre et les molécules d'eau dans un milieu humide. La détermination de ce paramètre s'avère importante, en vue de son influence sur les propriétés chimiques, physiques et mécaniques de la fibre, ainsi que sur l'adhésion entre la fibre et la matrice pour le développement des matériaux composites.

Le taux de reprise d'humidité de la fibre de sisal est calculé selon la norme NF G 08-001-4. Un échantillon de 100 g de fibre de sisal a été séché à 60°C pendant 12 heures, jusqu'à la stabilité de la masse. Puis, l'échantillon est placé dans une pièce conditionnée (T = 22 °C, HR = 62%) et pesé toutes les 15 minutes jusqu'à ce que la masse se stabilise à nouveau. Le taux de reprise d'humidité de la fibre est calculé par la méthode gravimétrique. La capacité de diffusion de la molécule d'eau dans la fibre de sisal placée dans un milieu humide est modélisée selon la

II. Étude des structures fibreuses de sisal aux échelles fibre et fil

loi de Fick, comme évoqué dans la section II.2.3.2.

$$M_H(\%) = \frac{W_f - W_0}{W_0} \times 100 \quad (\text{II.6})$$

Avec :

M_H est le taux de reprise en humidité de la fibre de sisal, W_f est la masse à l'état de saturation de l'échantillon et W_0 est la masse initiale de l'échantillon.

L'hydrophilie de la fibre de sisal favorise l'absorption d'humidité avec un taux de 13,6% en masse. La fibre de sisal présente un comportement à l'humidité plus intéressant que la fibre de ramie avec un taux de récupération de 6% [39]. L'absorption d'humidité de la fibre passe par les mêmes phases que l'absorption d'eau par la fibre de sisal, expliquée dans la section II.2.3.2. L'absorption d'humidité dans la fibre de sisal contribue à l'insertion de molécules d'eau entre les molécules des constituants de la fibre, ce qui affecte les interactions entre les fibrilles de cellulose et la matrice de pectine [142].

Le coefficient de diffusion de la reprise en humidité de la fibre de sisal est de $1,77 \times 10^{-6}$ cm²/s (Tableau II-5). La différence entre la capacité d'absorption d'humidité de la fibre de sisal et de la fibre de jute est due à la plus grande hydrophobie de la fibre de sisal par rapport à celle de la fibre de jute.

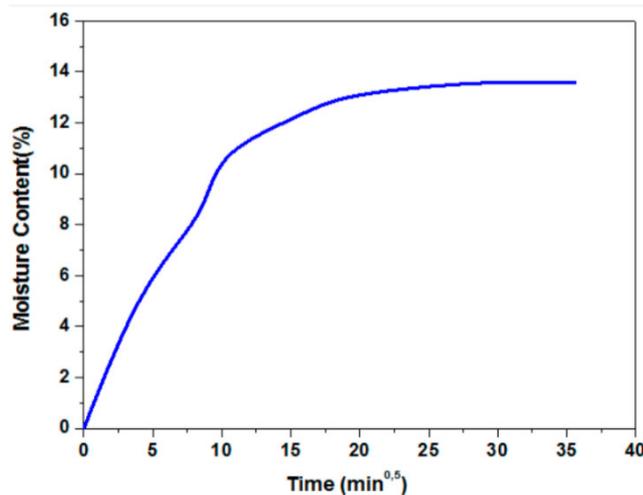


Figure II.8: Évolution de la reprise en humidité par la fibre de sisal

Tableau II-5: Taux de reprise en humidité et les paramètres de diffusion des fibres végétales

Fibre	Coefficient de diffusion D (cm ² .s ⁻¹) ×10 ⁻⁶	Coefficient de perméabilité S (cm ² .s ⁻¹) ×10 ⁻⁶	Taux de reprise en humidité (%)	Origine
Fibre de sisal	1,77±0,63	2,00±0,36	13,6	Maroc
Fibre de lin	2,00	-	12,0	France [149]
Fibre de jute	4,02	-	12,3	Inde [150]

II.2.3.4. Mouillabilité

La mouillabilité de la fibre de sisal définit la capacité de la surface de la fibre à entrer en contact avec un liquide. Cette caractéristique est un facteur important pour prédire le comportement de l'interface et l'adhésion entre la fibre et la matrice.

L'angle de contact de la fibre de sisal est un paramètre significatif pour l'évaluation de la mouillabilité de la fibre. La mesure de l'angle de contact est réalisée selon la méthode tensiométrique en utilisant un GBX Digidrop. Ce paramètre a été mesuré sur dix échantillons de fibre. La méthode tensiométrique se base sur la mesure de la masse du ménisque de l'eau distillée formée autour de la fibre (m) et sur la mesure du périmètre de mouillage de la fibre [2],[18]. Ensuite, l'angle de contact θ est calculé selon l'équation de Wilhelmy :

$$F = mg = \gamma_L p \cos \theta \quad (\text{II.7})$$

Avec : F est la force capillaire (N), g est l'accélération de la gravité (m.s⁻²), γ_L (mN/m) est la tension superficielle de l'eau distillée, p est le périmètre de mouillage et θ est l'angle de contact.

L'angle de contact de la fibre de sisal est de 53,06°. Le Tableau II-6 illustre la variation de l'angle de contact selon la composition chimique de chaque fibre végétale. En général, les fibres végétales en présence de constituants lignocellulosiques favorisent l'absorption de l'eau par les groupes hydroxyles. Autrement, cette propriété d'hydrophilie observée de la fibre de sisal limite son utilisation comme renforcement avec une matrice hydrophobe non polaire en raison d'une mauvaise adhésion interfaciale. L'hydrophilie de la fibre de sisal montre la capacité de la fibre à lier les molécules d'eau. Ce facteur est très important car il influence les propriétés

II. Étude des structures fibreuses de sisal aux échelles fibre et fil

interfaciales entre la fibre et la matrice.

Tableau II-6 : Angle de contact des fibres végétales

Fibre	Tension Superficielle de l'eau distillée γ_L (mN/m)	Angle de contact (°)	Origine
Fibre de sisal	73,13	53,6±4,63	Maroc
Fibre de lin	73,13	41,5	France [149]
Fibre de jute	73,13	63,9	Inde [150]

II.2.4. Propriétés chimiques de la fibre de sisal

La fibre de sisal est généralement composée de cellulose, hémicellulose et lignine (Tableau I-2 de la section I.2.3.1 du chapitre I). La composition chimique de la fibre permet de comprendre la structure intérieure de la fibre influençant la performance mécanique de la fibre. La spectroscopie Infrarouge à transformée de Fourier Plusieurs a été utilisée pour l'analyse de la structure chimique des fibres végétales.

II.2.4.1. Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (FTIR)

La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) est une technique basée sur l'interaction entre le rayonnement infrarouge et l'échantillon analysé. Elle permet d'identifier les molécules organiques et inorganiques à partir de leurs propriétés vibratoires. L'échantillon est mis en contact avec un élément de détection (cristal). Une onde évanescente est créée à la suite de la réflexion du rayonnement infrarouge sur la surface interne du cristal. Une partie de l'énergie de cette onde est absorbée et la partie réfléchi est renvoyée vers le détecteur [151], [152].

L'analyse FTIR de la fibre de sisal a été effectuée à l'aide du spectromètre Thermo Scientific Smart OMNI-Sampler dans une gamme spectrale de 4000-400 cm^{-1} avec une résolution de 4 cm^{-1} . Les acquisitions du spectre ont été réalisées en accumulant 100 balayages entre la gamme spectrale (4000-400 cm^{-1}). Le spectre obtenu est traité à l'aide du logiciel OMNI Spectra.

La Figure II.9 montre les différentes bandes spectrales décrivant la composition chimique de la fibre de sisal. La première bande entre 3200 et 3500 cm^{-1} est attribuée à un groupe O-H, montrant la présence de l'hémicellulose et de la cellulose. Le pic identifié entre 2900 et 3100 cm^{-1} correspond à un groupe C-H lié à la cellulose et à l'hémicellulose. Ces deux bandes

II. Étude des structures fibreuses de sisal aux échelles fibre et fil

représentent à la fois les interactions macromoléculaires de la cellulose et de l'hémicellulose ainsi que la présence d'eau dans les fibres. La région de vibration d'étirement du groupement C-H au niveau de la bande autour de 1735 cm^{-1} est due à la présence de l'hémicellulose. La vibration de cisaillement de la liaison OH illustre la présence de l'eau libre dans la structure de la fibre. La pectine constituant la fibre apparaît à la vibration de la liaison carboxyle entre 1430 et 1420 cm^{-1} . Les fonctions carboxyles des pectines qui constituent la lamelle moyenne, sont également impactées par l'absorption d'eau. L'étirement des liaisons C-O au pic de 1225 cm^{-1} identifie la présence de la lignine. La cellulose est mise en évidence par l'étirement de la liaison C-O-C à la longueur d'onde 1023 cm^{-1} qui est la caractéristique de la nature polysaccharide de la fibre. Cette caractéristique est également influencée par l'augmentation de l'humidité [142], [153]–[155].

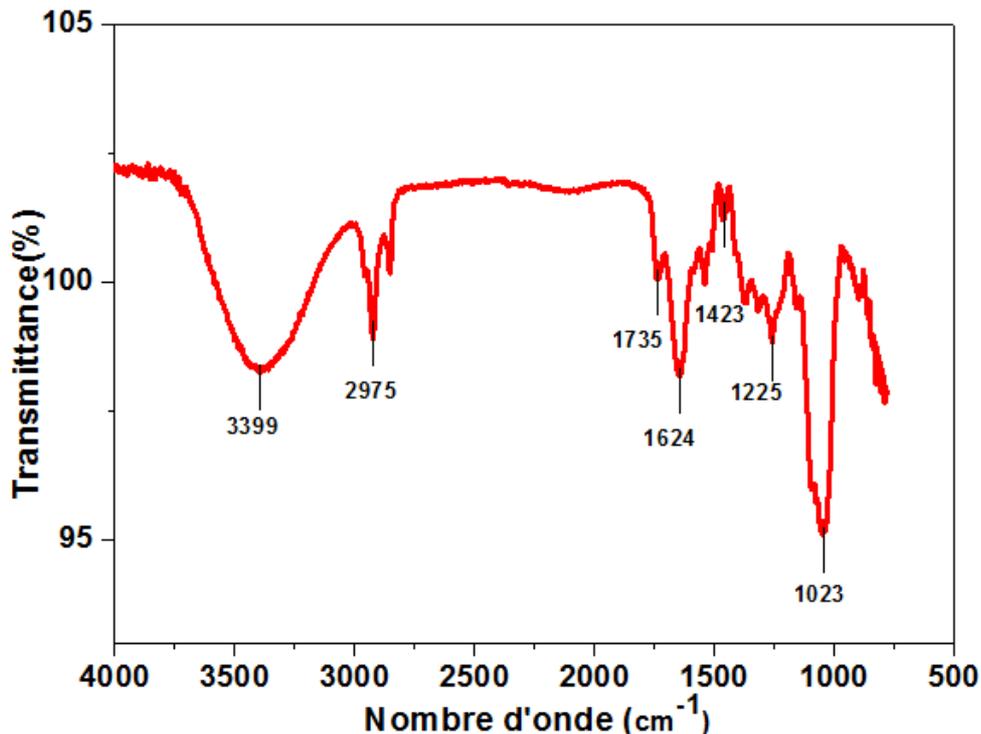


Figure II.9: Spectre FTIR de la fibre de sisal

II.2.5. Propriétés thermiques de la fibre de sisal

L'analyse des propriétés thermiques des fibres lignocellulosiques permet d'étudier la dégradation des fibres et prévoir les meilleures conditions de température de mise en œuvre des matériaux composites sans dégradation thermique des fibres lignocellulosiques. Cette caractérisation permet de confirmer la présence des différents composants principaux des fibres

II. Étude des structures fibreuses de sisal aux échelles fibre et fil

lignocellulosiques. L'analyse thermogravimétrique des fibres lignocellulosiques est une méthode d'analyse thermique des fibres lignocellulosiques.

II.2.5.1. Analyse thermogravimétrique (TGA)

L'analyse thermogravimétrique de la fibre de sisal permet de mesurer la variation de la masse de la fibre en fonction de la température. Cette analyse permet d'observer le processus de décomposition thermique de la structure de la fibre de sisal.

Un échantillon de 5,7 mg de fibre de sisal a été analysé en utilisant l'analyseur thermogravimétrique TGA-Q500 de TA Instruments. L'échantillon de la fibre sisal a été chauffé de 20°C à 600°C avec une vitesse de chauffage de 10 °C/min dans une atmosphère d'azote.

Le comportement thermique de la fibre de sisal est illustré dans la Figure II.10. La première phase de décomposition de la fibre est la déshydratation. Cette phase est divisée en deux étapes : la première étape est liée à la teneur en eau de la fibre de sisal, cette étape a lieu entre 50°C et 150°C. La deuxième étape de déshydratation est liée à la structure chimique des composants de la fibre (cellulose, hémicellulose). La déshydratation des composants de la fibre (cellulose, hémicellulose) se produit entre 150°C et 200°C. La perte de poids lors de la phase de déshydratation est de 9,67% du poids de l'échantillon. La deuxième phase concerne la dégradation de l'hémicellulose compte tenu de sa structure amorphe riche en branches qui facilite la dégradation de ses constituants. La température de décomposition est comprise entre 201°C et 320°C [156], [157]. La perte de poids lors de la décomposition de l'hémicellulose est de 20,9%. La troisième phase est liée à la dégradation de la cellulose. Elle est due au clivage de la liaison glycosidique du composant cellulosique de la fibre [158], [159]. La dernière phase de décomposition se produit entre 390°C et 475°C et est attribuée aux radicaux libres en atmosphère oxydante. Le résidu de la fibre de sisal à 600°C est de 10,56%. La gamme de température de la dégradation thermique des composants de la fibre (cellulose, hémicellulose et lignine) correspond à la même gamme de décomposition des résines thermoplastiques et thermodurcissables [160]. La fibre de sisal est résistante à une température de 220°C avec une masse résiduelle de 3%. La sensibilité à la température de la fibre de sisal est un facteur important dans la mise en œuvre des matériaux composites à base de cette fibre [142].

II. Étude des structures fibreuses de sisal aux échelles fibre et fil

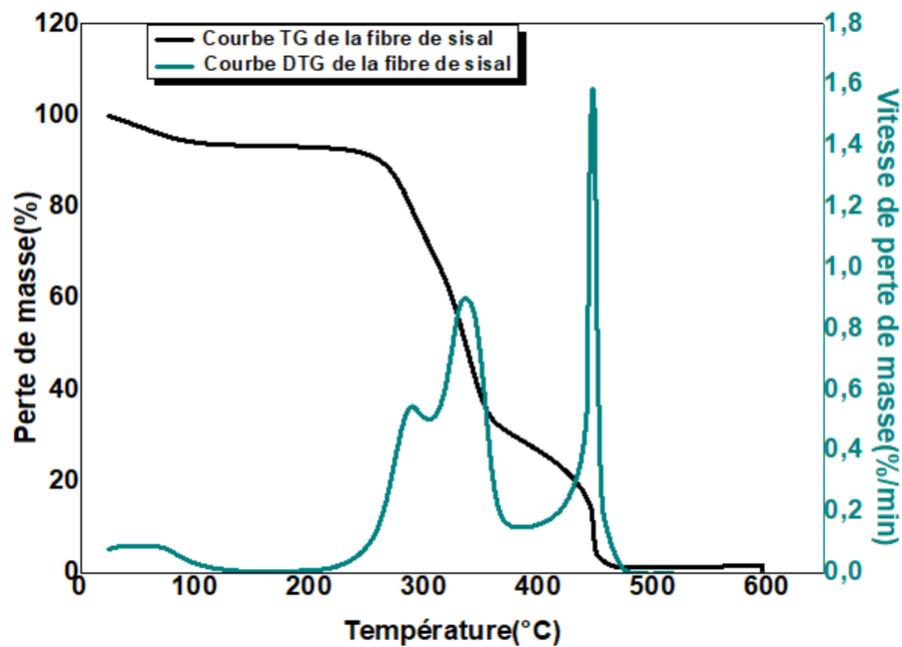


Figure II.10: Analyse thermogravimétrique de la fibre de sisal

II.2.6. Propriétés mécaniques de la fibre de sisal

L'évaluation du potentiel textile de la fibre de sisal se base principalement sur l'étude de la performance mécanique de la fibre. Deux méthodes principales de caractérisation en traction de la fibre de sisal ont été choisies pour identifier ses propriétés.

II.2.6.1. Détermination par l'essai de traction unitaire

Les propriétés en traction de la fibre de sisal ont été réalisées sur 30 échantillons selon la norme ISO 5079 [161], pour lesquels des mesures du diamètre des échantillons ont été effectués à l'aide du microscope optique Olympus BX5. Ensuite, les échantillons de 25 mm de longueur ont été serrés entre les pinces de la machine de charge universelle Zwick Z005 (Figure II.11) avec une vitesse de traverse fixée à 5mm/min et une longueur de jauge de 15 mm. Une pré-charge de 0,6 % a été appliquée pour empêcher le glissement des fibres. Les caractéristiques déterminées à partir de cet essai de traction unitaire de la fibre de sisal sont la résistance en traction, le module d'Young et l'allongement à la rupture.

La résistance à la traction (R_m) correspond à la contrainte maximale atteinte lors de l'essai de traction. Cette caractéristique est calculée par l'équation suivante :

II. Étude des structures fibreuses de sisal aux échelles fibre et fil

$$R_m = \frac{F_{\max}}{S_0} \quad (\text{II.8})$$

Avec :

R_m (MPa) est la résistance à la traction, F_{\max} (N) est la force maximale, S_0 est la section de l'échantillon de la fibre de sisal (mm^2) - (la section de la fibre de sisal est supposée cylindrique).

- Le module d'élasticité E_1 (GPa) correspond à la pente droite de la courbe « contrainte-déformation (0 et 0,1%) ».
- Le module d'élasticité E_2 (GPa) correspond à la pente droite de la courbe « contrainte-déformation (0,3 et 0,5%) ».
- L'allongement à la rupture (A) est un paramètre sans dimension définissant la capacité de l'allongement de la fibre avant de se rompre. Ce paramètre est calculé selon l'équation suivante :

$$A = \frac{L_r - L_0}{L_0} \quad (\text{II.9})$$

Avec :

A (%) est l'allongement à la rupture, L_r (mm) est la longueur maximale avant la rupture de la fibre et L_0 (mm) est la longueur initiale de la fibre avant l'essai de traction.



Figure II.11: Machine de charge universelle Zwick Z005

La Figure II.12 illustre le comportement en traction de la fibre de sisal. La fibre de sisal

II. Étude des structures fibreuses de sisal aux échelles fibre et fil

présente un comportement fragile avec une chute de charge soudaine suivie d'un léger ramollissement lorsque la rupture de la fibre se produit. La courbe représente une partie initiale non linéaire suivie d'une partie linéaire avant rupture. La partie initiale non linéaire de la courbe peut être liée à la réorientation des microfibrilles dans l'axe des sollicitations, tandis que la partie linéaire peut être attribuée à l'allongement et la déformation des microfibrilles [162].

Un adoucissement est remarqué dans l'allure de la courbe « contrainte-déformation ». Le Tableau II-7 résume les propriétés mécaniques des échantillons de fibres de sisal. Le diamètre moyen était de $239,0 \pm 80,18 \mu\text{m}$ car le sisal est composé de fibres rugueuses et épaisses. La résistance moyenne à la traction de la fibre de sisal est de $352,5 \pm 40,4 \text{ MPa}$. Le module d'élasticité E_1 moyen de la fibre de sisal est de $12,5 \pm 7,8 \text{ GPa}$. Le module d'élasticité E_2 moyen de la fibre de sisal est de $12,79 \pm 5,45 \text{ GPa}$. L'allongement moyen à la rupture de la fibre de sisal est de $4,1 \pm 0,8 \%$. La variabilité des propriétés en traction de la fibre de sisal en fonction du lieu de plantation dépend généralement des conditions climatiques et de la nature de la zone de culture de la plante (zone semi-aride, zone aride). Les propriétés en traction de la fibre de sisal d'origine marocaine présentent les bonnes propriétés en traction en comparaison avec les fibres de sisal provenant de différents lieux de plantation (Inde, Mexique). La fibre de sisal d'origine brésilienne présente les meilleures propriétés en traction en comparaison avec la fibre de sisal d'origine marocaine (Tableau II-7). Cela est dû au diamètre de la fibre de sisal d'origine brésilienne qui présente moins de défaut que le diamètre de la fibre de sisal d'origine marocaine [163].

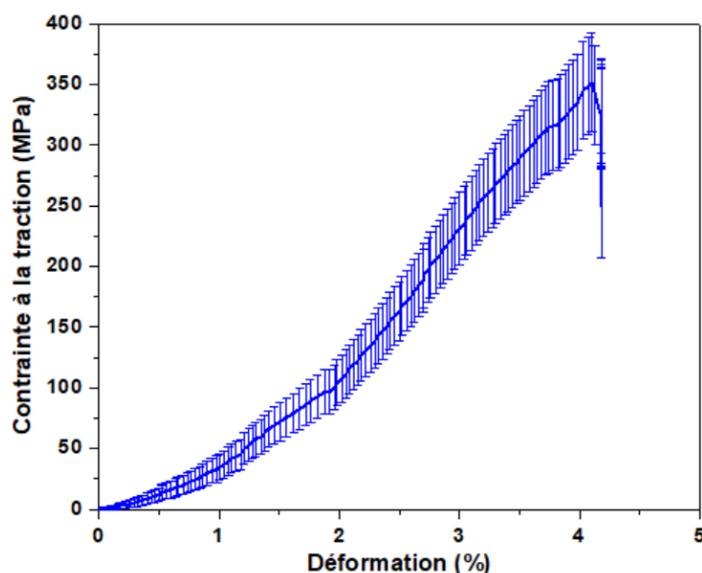


Figure II.12: Courbe « contrainte-déformation » de la fibre de sisal

Tableau II-7: Propriétés mécaniques de la fibre de sisal selon l'origine

Fibre	Diamètre (µm)	Résistance à la traction (MPa)	Module d'élasticité E_f (GPa)	Module d'élasticité E_f (GPa)	Allongement à la rupture (%)	Origine
	239,0±80,2	352,5 ± 40,4	12,5±7,8	12,79±5,45	4,1±0,8	Maroc
Fibre de sisal	269,8±78,0	294,0±113,0	-	-	-	Inde [143]
	200,0±75,6	391,0±89,0	10,7±4,0		5,2±2,5	Brésil [54]
	-	283,5±12,1	5,24±14,7		7,84±10,98	Mexique [164]

II.2.6.2. Détermination par l'essai du fil de fibres imprégnées

L'essai IFBT (Impregnated Fiber Bundle Test) [60] permet à partir des propriétés mesurées sur des échantillons composites, de remonter, à l'aide de la loi des mélanges, aux propriétés des fibres qui constituent ces échantillons composites et dont les caractéristiques sont recherchées. En 2013, le comité scientifique européen de la confédération européenne du lin et du chanvre (CELC) a décidé d'adapter la méthodologie d'essai (IFBT) normalisée pour les filaments de carbone continus aux spécificités des fibres naturelles. La complexité de la structure des fibres naturelles et plus particulièrement, la fibre de sisal favorise l'analyse du comportement mécanique par la méthode (IFBT) [139]. Afin d'étudier de manière plus approfondie les propriétés en traction de la fibre de sisal, la méthode (IFBT) a été choisie pour compléter la compréhension du comportement mécanique de la fibre de sisal. Cette méthode a été appliquée aux fils de sisal.

II.2.6.2.1. Préparation des éprouvettes

La méthode IFBT utilise des échantillons composites à partir de fils à base de fibres de sisal et sont fabriqués aux dimensions définies selon la norme ISO 10618 [165]. Les éprouvettes sont réalisées en utilisant un moule comportant cinq portes-éprouvettes avec une dimension de 250 mm de longueur, 10 mm de largeur et 2 mm d'épaisseur pour chaque éprouvette. La masse de fil, incorporée dans chaque éprouvette, est calculée en ciblant une fraction volumique de fibres à 50%. Le volume total de l'éprouvette étant de 5000 mm³, la masse de fibres de sisal pour une éprouvette est calculée en fonction de l'équation (II.10):

$$v_f = \frac{m_f}{\rho_f \times V_c} \quad (\text{II.10})$$

II. Étude des structures fibreuses de sisal aux échelles fibre et fil

Avec :

m_f est la masse des fils de la fibre de sisal (g), v_f est la fraction volumique des fils de la fibre de sisal (%), V_c est le volume total du composite (cm³) et ρ_f est la densité de la fibre de sisal de 1,45 g/cm³ (calculée dans la section II.2.3.1).

La masse des fibres de sisal pour une fraction volumique de 50% est de 3,62 g. Ainsi, la masse de la résine calculée pour compléter le volume des éprouvettes est de $m_r=3g$. La résine est introduite à l'aide d'une seringue en rassurant la bonne imprégnation des fils de sisal. La résine utilisée est la résine SR8200 avec son durcisseur SD7204 de chez SICOMIN, avec un dosage en masse de 100g de résine pour 37g de durcisseur. Les fils de sisal sont préalablement séchés à une température de 60° C dans l'étuve Prolabo 53L durant 24 heures. Après l'étape de séchage, la préparation de chaque éprouvette a consisté à insérer en premier une bâche à vide. Ensuite, une bonne quantité de résine a été introduite puis la moitié des fils de fibre de sisal a été déposée. Ensuite, la résine a été ajoutée pour recouvrir les fils. Puis, le reste des fils a été déposé ainsi que le reste de résine nécessaire pour assurer la bonne imprégnation de l'éprouvette. Les cales de 2 mm d'épaisseur ont été ajoutées aux extrémités du moule, pour obtenir une épaisseur de 2 mm lors du passage du moule sous presse. Les morceaux non tissés ont été ajoutés aux extrémités du moule pour absorber l'excès de résine. La bâche à vide a été fermée et une barre métallique a été ajoutée pour fermer le moule (Figure II.13). Après la préparation des cinq éprouvettes, des barres métalliques ont été posées entre les éprouvettes pour augmenter la surface de contact avec la presse. Un morceau de non-tissé a été posé sur le moule pour l'absorption de l'excès de résine puis un morceau de téflon a été posé en dessus du non-tissé avant de mettre le moule sous presse.

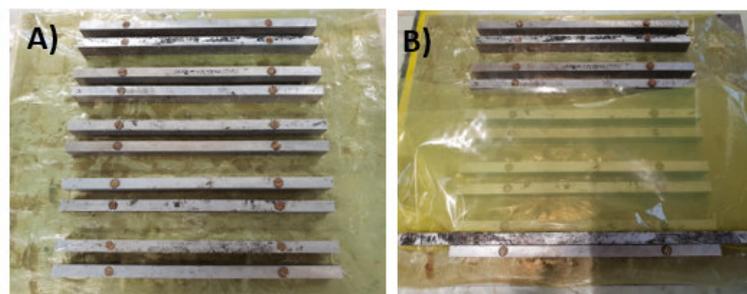


Figure II.13:Préparation des éprouvettes IFBT, A)- Moule IFBT , B)-Préparation de la première éprouvette IFBT

II. Étude des structures fibreuses de sisal aux échelles fibre et fil

Après la préparation du moule, ce dernier a été placé dans une presse chauffante (DOLOUETS 40140 SOUSTONS) à 60°C pendant 8 heures (Figure II.14) sous une pression de 120 bars pour favoriser le durcissement de la résine et pour assurer la réalisation des éprouvettes de 2 mm d'épaisseur. Ensuite, le moule a été déplacé dans une étuve de la marque MEMMERT à 60°C pendant 16 heures. Puis, les éprouvettes ont été démoulées et pesées pour déterminer la fraction volumique de fibres et de porosités. Les éprouvettes ont été conservées dans une chambre conditionnée (20 °C, 61%) avant de les caractériser en traction. L'essai de traction a été effectué sur chaque éprouvette à une vitesse de 1 mm/min et avec une longueur de jauge de 150 mm en utilisant la machine de traction INSTRON 5985 avec une charge maximale de 250 KN. Le déplacement réel de chaque éprouvette durant l'essai de traction a été déterminé en marquant trois points sur l'éprouvette et en capturant les photos de l'éprouvette toutes les secondes durant l'essai de traction, ensuite le déplacement des points marqués sur l'éprouvette est suivi en traitant les photos de l'éprouvette à l'aide du logiciel GOM Correlate.



Figure II.14: Moule IFBT placé dans la presse chauffante

II.2.6.2.2. Observation morphologique des éprouvettes

Après la réalisation des éprouvettes IFBT (Impregnated Fiber Bundle Test), la qualité de l'imprégnation a été évaluée en observant la coupe transversale des éprouvettes à l'aide de la loupe binoculaire Novex. Les coupes transversales observées (Figure II.15) montrent la bonne imprégnation des fibres de sisal au sein de l'éprouvette.

II. Étude des structures fibreuses de sisal aux échelles fibre et fil

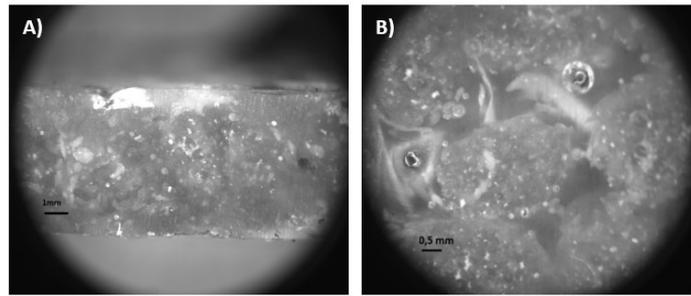


Figure II.15: A) -Observation de la coupe transversale d'une éprouvette IFBT, B) - son agrandissement ($\times 10$)

II.2.6.2.3. Détermination de la fraction volumique et la porosité des éprouvettes IFBT

Après la réalisation des cinq éprouvettes IFBT(Impregnated Fiber Bundle Test) de fibres de sisal, la fraction volumique des fibres au sein des éprouvettes (fibre, matrice) a été déterminée selon la norme ISO 14127 [166] en utilisant l'équation (II.10) indiquées dans la section II.2.6.2.1. La fraction volumique de la matrice a été calculée à l'aide de l'équation (II.11):

$$v_m = \frac{V_m}{V_c} \text{ avec } V_m = \frac{m_m}{\rho_m} \quad (\text{II.11})$$

Avec :

v_m est la fraction volumique de la matrice (%), V_m est le volume de la matrice (cm^3), V_c est le volume de l'éprouvette (cm^3), ρ_m est la densité de la matrice (g/cm^3) et m_m est la masse de la matrice (g).

La densité de la matrice (résine SR8200 avec durcisseur SD7204) est de $1,13 \text{ g}/\text{cm}^3$ et la densité de la fibre de sisal est de $1,45 \text{ g}/\text{cm}^3$.

La fraction volumique de porosités est une caractéristique permettant d'évaluer la qualité de l'imprégnation des éprouvettes. Cette caractéristique est calculée par l'équation suivante :

$$v_p = 1 - v_f - v_m \quad (\text{II.12})$$

II. Étude des structures fibreuses de sisal aux échelles fibre et fil

Avec :

v_p est la fraction volumique de porosités, v_f est la fraction volumique des fibres de sisal et v_m est la fraction volumique de la matrice.

Le Tableau II-8 donne les paramètres calculés des cinq éprouvettes. La fraction volumique de fibres de sisal des éprouvettes réalisées est comprise entre 45,84 et 52,14%. La fraction volumique de fibres de sisal des éprouvettes réalisées est proche de la gamme souhaitée (50%). La fraction volumique de porosités des éprouvettes réalisées est comprise entre 4 et 7 %.

Tableau II-8: Fraction volumique des fils tordus de la fibre de sisal, de la matrice et de la porosité des éprouvettes IFBT

Éprouvettes	Fraction Volumique de la fibre Vf (%)	Fraction Volumique de la matrice Vm (%)	Fraction Volumique de la porosité Vp (%)
Ép1	45,84	49,4	4,76
Ép2	47,62	42,32	5,3
Ép3	48,65	43,17	5,48
Ép4	51,65	45,2	6,45
Ép5	52,14	45,11	7,03

II.2.6.2.4. Détermination des propriétés des éprouvettes IFBT

Les propriétés en traction des éprouvettes IFBT (Impregnated Fiber Bundle Test) ont été identifiées selon la norme ISO 527-4 [167]. Le module d'élasticité est la propriété mécanique étudiée dans la méthode IFBT pour déduire les propriétés de la fibre de sisal. La Figure II.16 illustre l'allure de la courbe de traction « contrainte – déformation » d'une éprouvette IFBT. Deux modules sont identifiés à partir des courbes de traction des éprouvettes IFBT, le premier module E_{f1} est calculé entre 0 et 0,1% de déformation et le deuxième module E_{f2} est calculé entre 0,3 et 0,5%. L'allure de la courbe de traction des éprouvettes IFBT montre le comportement quasi-linéaire des éprouvettes IFBT. Le Tableau II-9 donne la valeur moyenne des deux modules des cinq éprouvettes réalisées. Le comportement des éprouvettes réalisées est similaire au comportement révélé dans la littérature des composites renforcés de fibres de sisal [168].

II. Étude des structures fibreuses de sisal aux échelles fibre et fil

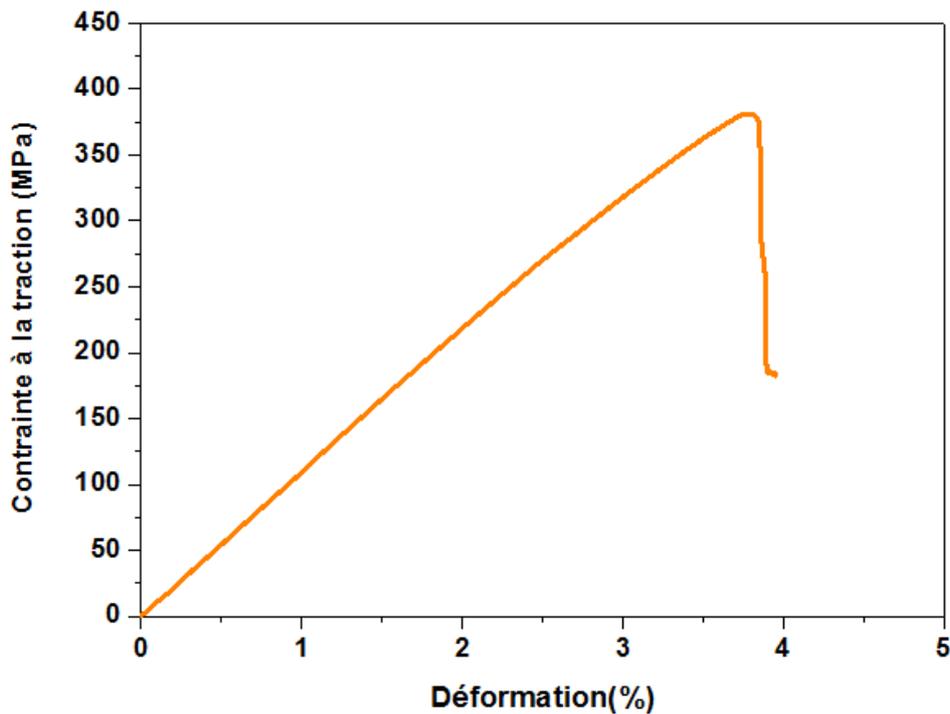


Figure II.16: courbe de traction « contrainte – déformation » d'une éprouvette IFBT

Tableau II-9: Modules d'élasticité des éprouvettes IFBT

Éprouvette IFBT	$E_{c1}(0 - 0,1\%)$ (GPa)	$E_{c2}(0,3 - 0,5\%)$ (GPa)
	$30,80 \pm 5,76$	$31,54 \pm 4,52$

II.2.6.2.5. Détermination des propriétés des fibres par les différentes lois des mélanges

La méthode IFBT (Impregnated Fiber Bundle Test) consiste à déduire les propriétés mécaniques des fibres à partir des propriétés mécaniques des fils imprégnés en utilisant les différents modèles de la loi des mélanges. Exprimés en module, ces modèles permettent, par calcul inverse de déduire le module des fibres qui constituent ces éprouvettes composites. Différents modèles des lois des mélanges ont été proposés pour tenir compte des différents paramètres influençant les propriétés mécaniques des éprouvettes IFBT, tels que : le taux de porosité ou la torsion. Les caractéristiques textiles des fils de sisal utilisés dans cette méthode ont été mesurées selon les normes standard (le titrage déterminé selon la norme NF G07-316[169] et la torsion déterminée selon la norme NF G07-079 [170]).

II. Étude des structures fibreuses de sisal aux échelles fibre et fil

II.2.6.2.5.1 Loi des mélanges classique

Le principal modèle proposé pour la détermination des propriétés des fibres est fondé sur la loi des mélanges classique en fonction de la fraction volumique des fibres et de la matrice, et des valeurs des modules des fibres et de la matrice. Les deux modules E_{f1} et E_{f2} des fibres sont calculés à partir de l'équation suivante :

$$E_c = E_f v_f + E_m (1 - v_f) \text{ et } E_f = \frac{E_c - E_m (1 - v_f)}{v_f} \quad (\text{II.13})$$

Avec :

E_c est le module en traction-du composite (GPa), E_f est le module en traction-des fibres (GPa), E_m est le module en traction-de la matrice (GPa) et v_f est la fraction volumique des fibres (%).

Les modules en traction de la fibre de sisal ont été calculés selon l'équation (II.13). Le Tableau II-10 donne les valeurs moyennes de ces modules dans les 2 gammes de déformation considérées.

Tableau II-10: Les modules d'élasticité de la fibre de sisal selon la loi des mélanges classique

Fibre de sisal	E_{f1} (0 - 0,1%) (GPa)	E_{f2} (0,3 - 0,5%) (GPa)
	9,68±2,45	9,35±1,75

La loi des mélanges classiques utilisée suppose que le taux de porosités dans les éprouvettes IFBT est nul, ainsi que les fibres sont alignées au sein des éprouvettes. Plusieurs travaux dans la littérature ont montré l'influence du taux de porosités dans les fibres naturelles imprégnées sur les propriétés mécaniques [67].

II.2.6.2.5.2 Loi des mélanges modifiée incluant le taux de porosités

Le deuxième modèle est décrit à l'aide de l'équation (II.14) en modifiant l'équation (II.13) de la loi classique des mélanges. Cette modification permet de considérer le taux de porosités des éprouvettes réalisées dans la détermination des modules des fibres[67], [171].

II. Étude des structures fibreuses de sisal aux échelles fibre et fil

$$E_c = (E_f v_f + E_m (1 - v_f))(1 - v_p)^n \text{ et } E_f = \frac{\frac{E_c}{(1-v_p)^n} - E_m (1-v_f)}{v_f} \quad (\text{II.14})$$

Avec :

v_p est la fraction volumique des fibres (%) et n est le facteur de porosités.

Le facteur de porosités n quantifie l'effet de la porosité donnant des concentrations dans les composites. Madsen et al. [67], [171] ont constaté que le facteur de porosité $n = 2$ donne des résultats proches des résultats expérimentaux pour les composites renforcés des fibres naturelles. Cette valeur sera choisie pour la détermination des propriétés de la fibre de sisal dans ces travaux.

Le Tableau II-11 donne la valeur moyenne des modules de la fibre de sisal selon la loi des mélanges incluant le taux de porosité. La prise en compte de la porosité dans la loi des mélanges influence sur les deux modules E_{f1} et E_{f2} . L'augmentation des valeurs de module, relativement au calcul à l'aide de la loi des mélanges classique (Tableau II-10), a été également constatée dans les travaux concernant la caractérisation de la fibre de lin [172] et de la fibre de chanvre [91].

Tableau II-11: Les modules d'élasticité de la fibre de sisal selon la loi des mélanges incluant le taux de porosité

	$E_{f1} (0 - 0,1\%) \text{ (GPa)}$	$E_{f2} (0,3 - 0,5\%) \text{ (GPa)}$
Fibre de sisal	12,33±3,86	13,27 ± 2,36

II.2.6.2.5.3 Loi des mélanges modifiée incluant le taux de porosités et le coefficient de torsion en fonction des propriétés des fibres

Le troisième modèle de la loi des mélanges considère, en plus du niveau de porosités, les caractéristiques des fibres au sein des éprouvettes IFBT (orientation et longueur des fibres). L'équation de la loi des mélanges modifiée dépend d'un coefficient de longueur des fibres η_1 , d'un coefficient d'orientation des fibres η_0 et du taux de porosités (équation (II.15)):

II. Étude des structures fibreuses de sisal aux échelles fibre et fil

$$E_c = (\eta_0 \eta_1 E_f v_f + E_m (1 - v_f))(1 - v_p)^n \text{ et } E_f = \frac{\frac{E_c}{(1-v_p)^n} - E_m (1-v_f)}{\eta_0 \eta_1 v_f} \quad (\text{II.15})$$

Avec :

η_0 est le coefficient d'orientation des fibres, η_1 est le coefficient de longueur des fibres et n est le facteur de porosités.

Le coefficient de longueur des fibres η_1 peut être relié au rapport d'aspect des fibres (Longueur/Diamètre) en analysant les données classiques révélées dans la littérature sur les composites renforcés de fibres naturelles (équation ((II.16)). La Figure II.17 illustre la relation entre ce coefficient des fibres naturelles et le rapport d'aspect des fibres naturelles. Le rapport d'aspect des fibres naturelles est donc supérieur à 50, ce qui permet de considérer le coefficient de longueur de la fibre de sisal η_1 égal à 1 dans cette étude de caractérisation des propriétés de la fibre de sisal [67], [171].

$$\eta_1 = 2 \frac{L}{D} \sqrt{\frac{G_m}{E_f \ln\left(\frac{k}{v_f}\right)}} \quad (\text{II.16})$$

Avec :

L est la longueur des fibres (m), D est le diamètre des fibres (m), G_m est le module de cisaillement de la matrice (GPa) et K est la constante liée à la compaction des fibres identifiée dans [173].

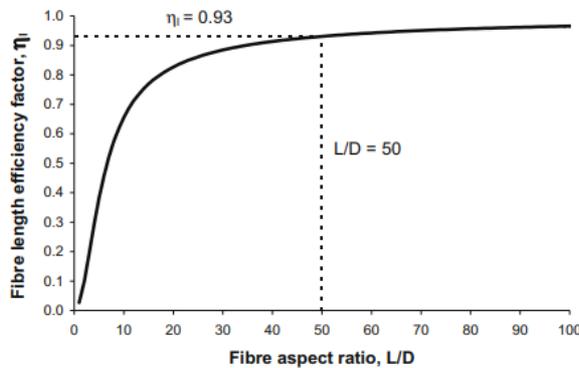


Figure II.17: Facteur de longueur des fibres en fonction du rapport d'aspect des fibres

II. Étude des structures fibreuses de sisal aux échelles fibre et fil

Le coefficient d'orientation des fibres η_0 correspond à la modélisation de la torsion des fils au sein des éprouvettes IFBT. Deux méthodes de détermination de l'angle de torsion des fils ont été présentées dans la littérature.

La première méthode de détermination du coefficient d'orientation des fibres η_0 dépend de la torsion des fils et du rayon du fil via l'équation (II.17). Le rayon des fils des fibres a été défini à l'aide du microscope optique.

$$\eta_0 = \cos(2 \cdot \arctan(2\pi \cdot T \cdot r)) \quad (\text{II.17})$$

Avec :

T est la torsion des fils à base de fibres de sisal et r est le rayon des fils des fibres.

Le Tableau II-12 donne les valeurs moyennes des modules d'élasticité de la fibre de sisal selon la loi des mélanges modifiée incluant le taux de porosités et le coefficient de torsion en fonction des propriétés des fils. Les modules calculés à l'aide de cette loi modifiée sont supérieurs aux différentes valeurs calculées selon les autres lois des mélanges (Tableau II-10, Tableau II-11 et Tableau II-12).

Tableau II-12 : Les modules d'élasticité de la fibre sisal selon la loi des mélanges incluant le taux de porosités et le coefficient de torsion en fonction des propriétés des fils

	$E_{f1} (0 - 0,1\%) \text{ (GPa)}$	$E_{f2} (0,3 - 0,5\%) \text{ (GPa)}$
Fibre de sisal	17,06±2,64	17,25 ± 3,64

La deuxième méthode de détermination du coefficient d'orientation des fibres η_0 prend en compte la torsion des fils à base des fibres de sisal au sein des éprouvettes IFBT (torsion des fils et titre des fils) et de l'orientation des fibres au sein des fils par le coefficient de compaction (équations (II.18) et (II.19)) [168], [171]. La torsion des fils a été mesurée à l'aide d'un torsiomètre. Le titre des fils a été défini en mesurant et pesant les fils.

$$\eta_0 = \cos \left(2 \cdot \arctan \left(10^{-3} \cdot T \sqrt{4\pi \frac{L}{\rho\phi}} \right) \right) \quad (\text{II.18})$$

II. Étude des structures fibreuses de sisal aux échelles fibre et fil

$$\phi = 0,7(1 - 0,78e^{-0,195T}) \quad (\text{II.19})$$

Avec :

ρ est la densité de la fibre de sisal ($1,45 \text{ g/cm}^3$), L est le titre du fil ($3,3 \text{ KTex}$), T est la torsion des fils (80 tpm) et ϕ est le coefficient de compaction du fil.

Le Tableau II-13 donne la valeur moyenne des deux modules de la fibre de sisal selon la loi des mélanges incluant le taux de porosités et le coefficient de torsion en fonction des propriétés des fibres. Les modules d'élasticité E_{f1} et E_{f2} calculés par cette loi des mélanges modifiée sont supérieurs aux valeurs des modules calculés par la loi des mélanges incluant le taux de porosités (Tableau II-11).

Tableau II-13 : Les modules d'élasticité de la fibre sisal selon la loi des mélanges incluant le taux de porosités et le coefficient de torsion en fonction des propriétés des fibres

	$E_{f1} (0 - 0,1\%) \text{ (GPa)}$	$E_{f2} (0,3 - 0,5\%) \text{ (GPa)}$
Fibre de sisal	$14,73 \pm 2,75$	$14,47 \pm 3,36$

II.2.6.2.5.4 Comparaison des modèles des lois des mélanges pour les propriétés des fibres

La Figure II.18 montre la variation significative des valeurs des modules E_{f1} et E_{f2} par les différents modèles des lois des mélanges. Les modèle 3 et 4 sont associés respectivement au calcul du facteur d'orientation donné par les équations II.17 et II.18. Le module calculé par méthode inverse à l'aide du troisième modèle, prenant en compte le taux de porosités, le titre et la torsion des fils, donne la valeur la plus élevée du module E_{f1} et E_{f2} . Les valeurs des modules E_{f1} et E_{f2} obtenues à partir de différentes équations sont comprises entre 9 et 18 GPa. Les valeurs des modules E_{f1} et E_{f2} calculés par le test unitaire des fibres (section II.2.6.1) sont approximativement similaires à celles calculées à l'aide de la loi des mélanges modifiée incluant le taux de porosités (section II.2.6.2.5.2).

II. Étude des structures fibreuses de sisal aux échelles fibre et fil

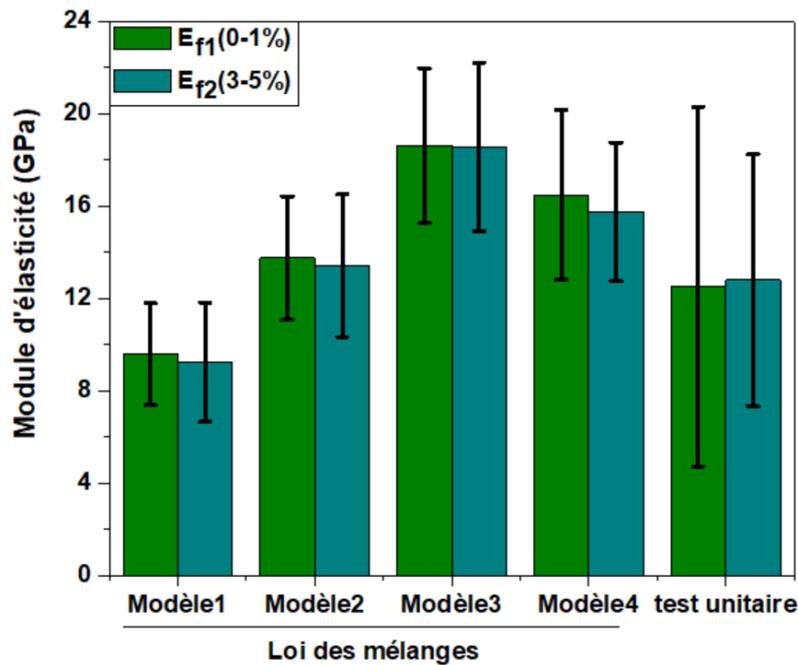


Figure II.18: Modules d'élasticité de la fibre de sisal calculés par les deux méthodes

II.2.6.2.5.5 Comparaison des propriétés de traction de la fibre de sisal d'origine marocaine avec la littérature

Le module d'élasticité de la fibre de sisal, déterminé par la méthode IFBT selon les différents modèles des lois des mélanges et l'essai de traction unitaire, est illustré dans le *Tableau II-14*. La gamme de la déformation considérée pour le calcul des modules d'élasticité de la fibre de sisal issus de la littérature, comparés avec les résultats obtenus dans cette étude, ne sont pas précisés pour l'identification des valeurs du module E_{f1} et E_{f2} . Les résultats obtenus sur le comportement de la fibre de sisal sont cohérents avec les propriétés de la fibre de sisal trouvées dans la littérature [125], [143], [168]. L'intervalle de variation du module d'élasticité de la fibre de sisal d'origine indienne est similaire à l'intervalle de variation du module d'élasticité de la fibre de sisal d'origine marocaine, calculé à l'aide des deux méthodes (essai de traction unitaire, méthode IFBT) [143]. Ces résultats sont en accord avec les travaux présentés dans la littérature concernant la caractérisation de la fibre de sisal [11], [12], [174].

Tableau II-14: Le module d'élasticité de la fibre de sisal selon l'origine et la méthode de caractérisation

Fibre	Module d'élasticité E_{f1} (GPa)	Module d'élasticité E_{f2} (GPa)	Méthode de caractérisation	Origine
Fibre de sisal	10,7 ± 4,0		Essai de traction unitaire	Brésil [38]
	7,47 ± 1,37		Essai de traction unitaire	Algérie [12]
	14,5 ± 5,86		Essai de traction unitaire	Inde [143]
	12,5 ± 7,8	12,79±5,45	Essai de traction unitaire	Maroc
	17,02 ± 3,74	17,25 ± 3,64	Méthode IFBT	Maroc [142]

II.3. Étude des structures fibreuses à l'échelle fil (approche mésoscopique)

La transformation de la fibre de sisal sous un format continu à l'aide du procédé de filature est essentielle pour la production des structures fibreuses tissées. Différents facteurs influent sur la performance et la tissabilité du fil, tels que : la torsion et le titre. Les propriétés du fil dépendent fortement des propriétés de la fibre.

II.3.1. Fil de sisal d'origine marocaine

La transformation de la fibre de sisal en fil suit le procédé principal de filature décrit dans le chapitre précédent (section I.3.1). Les principales étapes de la préparation du fil de sisal comportent :

Préparation des fibres de sisal : après extraction mécanique des fibres de sisal, celles-ci sont nettoyées à l'eau distillée puis séchées à température ambiante.

Lubrification des fibres de sisal : lors du procédé de filature, les fibres de sisal sont soumises à des sollicitations mécaniques contribuant à la rupture des fibres. Dans ce cas, la lubrification des fibres de sisal avec l'huile de sésame permet de protéger les fibres contre les sollicitations mécaniques en augmentant la résistance à la rupture de ces fibres.

II. Étude des structures fibreuses de sisal aux échelles fibre et fil

Peignage : les fibres de sisal sont classées parmi les fibres naturelles longues. Pour cela, l'individualisation des fibres de sisal se fait par le peignage de ces fibres. Les fibres de sisal sont passées dans un peigne pour éliminer les impuretés et individualiser les fibres. Des rubans souples de fibres sont obtenus après le peignage des fibres de sisal.

Étirage : les rubans obtenus après le peignage sont étirés pour obtenir une meilleure régularité des rubans.

Filature : les rubans obtenus sont tordus pour obtenir un fil résistant. Le principe de la torsion du fil se base sur la torsion du fil autour de son axe en maintenant fixe une extrémité et en retordant l'autre extrémité dans les sens inverse des aiguilles (sens Z). Les fils sont souvent tordus en Z car les machines à filer sont conçues pour des manipulateurs droitiers [175]. La torsion des fils permet d'améliorer la tissabilité de la fibre de sisal [97].

Les fils de sisal utilisés dans ces travaux de thèse sont fournis par la société marocaine SONAJUTE. Les fils de sisal sont tordus dans le sens Z (Référence 300/1 (m/kg)). Les propriétés des fils de sisal sont analysées selon les normes standard pour évaluer leur performance lors de la fabrication des structures fibreuses tissées. Les principales propriétés des fils de sisal sont : les propriétés morphologiques, les propriétés physiques et les propriétés mécaniques. Avant de procéder à l'analyse des différentes propriétés du fil de sisal, les bobines des fils de sisal ont été conditionnées à la température ambiante (20°C) et une humidité relative de 65% durant 48 heures selon la norme ISO 139 [176].



Figure II.19: Fil de sisal

II.3.2. Propriétés morphologiques du fil de sisal

La structure des fils de sisal a été analysée à l'aide du microscope digital LCD DM 5. 25 échantillons de fils d'une longueur de 40 mm ont été visualisés et la valeur moyenne de leurs

II. Étude des structures fibreuses de sisal aux échelles fibre et fil

diamètres a été calculée. La Figure II.20 illustre la structure du fil de sisal comportant des fibres courtes sortant du fil. La présence de ces fibres courtes à la surface du fil est due au désalignement des fibres lors de sa torsion. La surface du fil de sisal peut engendrer le blocage du fil lors de son passage dans les lisses de la machine à tisser, ce qui dégrade la performance mécanique du fil.



Figure II.20: Image microscopique du fil de sisal

La valeur moyenne du diamètre du fil de sisal est de $2,03 \pm 0,98$ mm (Tableau II-15). La variabilité du diamètre tout au long de la longueur du fil de sisal est attribuée à l'irrégularité du diamètre de la fibre de sisal observée dans l'analyse des propriétés de la fibre de sisal (section II.2.2). Belaadi et al. [177] ont montré la variabilité des propriétés morphologiques du fil de sisal d'origine algérienne avec une valeur moyenne du diamètre de $2,04 \pm 0,26$ mm. La différence constatée entre l'intervalle de variation du diamètre du fil de sisal d'origine marocaine et algérienne dépend des conditions climatiques lors de la culture de la plante, du procédé d'extraction de la fibre de sisal et du procédé de filature.

Tableau II-15: le diamètre du fil de sisal selon l'origine

Fil	Diamètre (mm)	Origine
Fil de sisal	$2,03 \pm 0,98$	Maroc
	$2,04 \pm 0,26$	Algérie[177]

II. Étude des structures fibreuses de sisal aux échelles fibre et fil

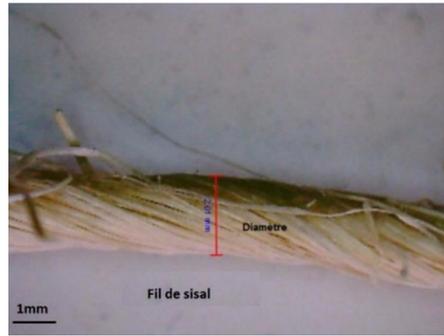


Figure II.21: Mesure du diamètre du fil de sisal

II.3.3. Propriétés physiques du fil de sisal

Les propriétés physiques du fil de sisal ont été analysées en déterminant le titre (masse linéique) et l'angle de torsion selon les normes standard.

II.3.3.1. Détermination du titrage du fil

Le titre du fil de sisal a été calculé en mesurant la longueur et la masse selon la norme NF G07-316 [169]. Le titre est calculé en utilisant l'équation suivante :

$$T(\text{Tex}) = \frac{m}{L} \times 1000 \quad (\text{II.20})$$

Avec :

m est la masse du fil (g) et L est la longueur du fil (m).

Dix échantillons de fil d'une longueur de 10 mètres ont été mesurés et pesés. La valeur moyenne du titre du fil de sisal est de 3300 ± 700 Tex (Tableau II-16). Par comparaison, le titre des fils de sisal d'origine indienne est de 2800 Tex [178]. Le lieu de plantation de la plante d'agave sisalana permet d'influencer les propriétés physiques du fil de sisal et plus précisément le titre du fil.

Tableau II-16: le titre du fil de sisal selon l'origine

Fil	Titre (Tex)	Origine
Fil de sisal	3300 ± 700	Maroc
	311	Inde[178]

II.3.3.2. Détermination de la torsion du fil

La torsion du fil de sisal permet d'assurer la cohésion des fibres de sisal pour l'utilisation du fil dans le procédé de tissage. La torsion appliquée au fil a été mesurée à l'aide du torsiomètre Zweigle. Le principe de mesure se base sur la méthode double contre-épreuve, qui permet de soumettre le fil à trois essais de détorsion - torsion pour calculer la torsion moyenne avec précision. 20 échantillons de fil ont été mesurés selon la norme NF G07-079[170]. La valeur moyenne de la torsion du fil de sisal est de 80 tours/m (tpm).

L'angle de torsion du fil de sisal est un paramètre décrivant l'orientation des fibres sur la surface du fil de sisal. La détermination de l'angle de torsion du fil de sisal a été basée sur la méthode expérimentale en comparaison avec deux modèles théoriques. La mesure expérimentale de l'angle de torsion du fil de sisal a été réalisée en traitant les images microscopiques à l'aide du logiciel imageJ. Deux modèles ont été proposés dans la littérature pour la détermination de l'angle de torsion théorique sur la base du facteur d'orientation des fibres évoqué dans la section (II.2.6.2.5.3).

L'angle de torsion du fil de sisal (α) a été modélisé par deux méthodes avec l'hypothèse d'une forme de section transversale circulaire du fil [67], [99].

Méthode 1 : la section du fil n'est pas considérée comme étant pleine de fibres. Dans ce cas les fibres sont réparties dans la section du fil et se comportent selon le modèle semi-empirique proposé par Pan [67], [99], et donné par les deux équations (II.18) et (II.19). Ainsi, l'angle de torsion des fibres sur la surface extérieure du fil est calculé par l'équation (II.21).

$$\alpha = \tan^{-1} \left(T \cdot 10^{-3} \sqrt{\frac{4\pi L}{\rho\phi}} \right) \quad (\text{II.21})$$

Méthode 2 : la section du fil est considérée comme pleine de fibres, donc le facteur de remplissage de fibres dans la section du fil est égal à un et l'angle de torsion des fibres est calculé par l'équation (II.22) [67], [99].

II. Étude des structures fibreuses de sisal aux échelles fibre et fil

$$\alpha = \tan^{-1} \left(T 10^{-3} \sqrt{\frac{4\pi L}{\rho}} \right) \quad (\text{II.22})$$

Avec :

ρ est la densité de la fibre de sisal (1,45 Kg/m³), T est la torsion du fil de sisal (tours/m), L est le titre du fil de sisal (3,3 kTex) et ϕ est le coefficient de compaction du fil de sisal.

L'angle de torsion des fils de sisal a été calculé sur la base des deux configurations de la section transversale du fil. L'angle de torsion des fils obtenus avec un facteur de compaction est de 26,92°, tandis que l'angle de torsion sans facteur de compaction est de 23,16°. A partir des échantillons élaborés pour la méthode IFBT (section II.2.6.2), le facteur de compaction a été vérifié par une équation en mesurant la section transversale du fil dans la Figure II.15 à l'aide de l'équation (II.23) [142].

$$\phi = \frac{L}{\rho \times A_{fil}} \quad (\text{II.23})$$

Avec :

ρ est la densité de la fibre de sisal (1,45 Kg/m³), L est le titre du fil de sisal (3,3 kTex) et A_{fil} est la section transversale du fil de sisal (m²).

Le facteur de compaction du fil de sisal calculé avec l'équation (II.23) est de 70,2% avec un écart type de 5,63%. Avec ce facteur, l'angle de torsion du fil est de 23,65 ± 3,65°. Afin d'évaluer la précision des deux méthodes, l'angle de torsion a été mesuré à partir de photos du fil traitées à l'aide du logiciel ImageJ (Figure II.22). La valeur obtenue est de 23,14° avec un écart-type de 2,75°. Les résultats obtenus montrent que l'angle de torsion calculé par les deux méthodes est inclus dans la plage de variation de l'angle de torsion mesuré [142].

II. Étude des structures fibreuses de sisal aux échelles fibre et fil



Figure II.22: Fil de sisal avec la mesure de l'angle de torsion à l'aide du logiciel imageJ [142]

Tableau II-17: Angle de torsion du fil de sisal[142]

Fil de sisal	Méthode 1 selon l'équation (II.22)	Méthode 2 selon l'équation (II.23)	Méthode 2 selon l'équation (II.24)	Méthode expérimentale
Angle de torsion	26,92°	23,16°	24,16 ±3,65°	23,14 ±2,75°

II.3.4. Propriétés mécaniques du fil de sisal

Les propriétés mécaniques en traction des fils de sisal ont été analysées selon la norme ISO 2062 [179]. 25 échantillons de fils de sisal ont été testés à l'aide d'un banc de traction MTS SYSTEM à température ambiante avec une force maximale de 10 kN (Figure II.23). La vitesse de l'essai est de 10 mm/min et la longueur de la jauge est de 100 mm entre les pinces. Les mors à enroulement ont été utilisées pour les fils de sisal afin d'éviter que les fils ne glissent dans les mors. Le serrage des fils de sisal permet de fixer les fils dans les mors [180].



Figure II.23: Essai en traction du fil de sisal à l'aide du banc de traction MTS SYSTEM

II. Étude des structures fibreuses de sisal aux échelles fibre et fil

La Figure II.24 montre la courbe moyenne de l'effort en fonction de la déformation du fil de sisal. La courbe peut être divisée en deux zones, la première zone est non linéaire entre 1 et 4% de la valeur de déformation, ce qui peut être expliqué par le réalignement des fibres retordues au début de l'essai de traction [181]. La deuxième zone est quasi linéaire entre 4 et 7% de la déformation avant la rupture du fil. Le comportement observé des fils de sisal d'origine marocaine est similaire à celui des fils de sisal d'origine algérienne [177] et des fils de lin [181].

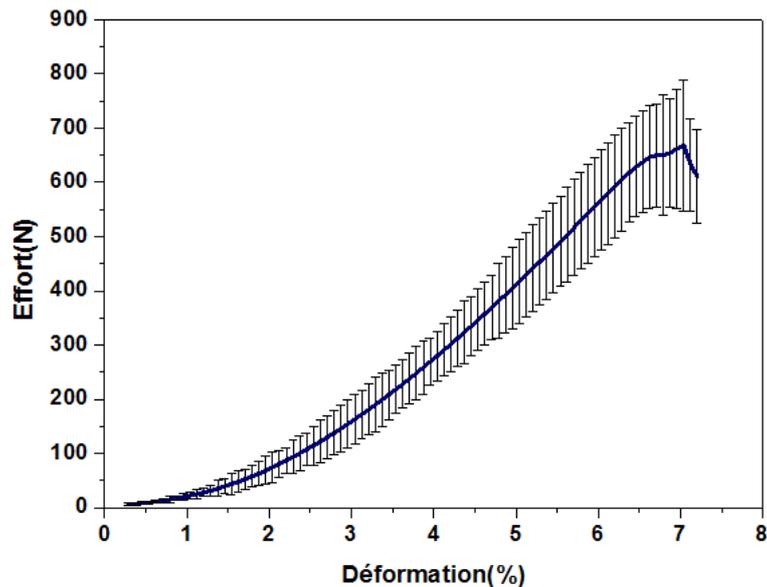


Figure II.24: Courbe « Effort - Déformation » du fil de sisal

La valeur moyenne de l'effort maximal est de $672,36 \pm 236$ N. La dispersion des valeurs de l'effort maximal du fil de sisal est due à la variabilité des propriétés des fibres de sisal. La valeur moyenne de la ténacité à rupture des fils de sisal est de $20,24$ cN/Tex ($\pm 3,25$) (Tableau II-18). La ténacité des fils de sisal d'origine indienne est de l'ordre de $18,38$ cN/Tex avec un effort maximal de $514,7$ N [178]. La valeur de la déformation à rupture des fils de sisal d'origine marocaine est inférieure à celle des fils de sisal d'origine indienne, ce qui est attribué à la valeur supérieure de l'allongement à rupture de la fibre de sisal d'origine indienne (6%) par rapport à celle de la fibre de sisal d'origine marocaine (4,1% (Tableau II-7)). La différence des propriétés mécaniques des fils de sisal selon l'origine dépend des conditions climatiques et de croissance de la plante agave sisalana dans les différentes régions.

Tableau II-18: La ténacité du fil de sisal selon l'origine

Fil	Ténacité à rupture (cN/Tex)	Déformation à rupture (%)	Origine
Fil de sisal	20,24 ± 3,24	7,04±0,46	Maroc
	18,38 ±2,97	10,6±2,21	Inde [178]

II.4. Influence du procédé de tissage sur les propriétés des fils et des fibres pour des structures tissées (2D et 3D)

II.4.1. Influence du procédé de tissage sur les propriétés des fils et des fibres pour des structures tissées 2D

Après l'identification des propriétés des fibres et des fils de sisal selon les différentes normes, l'étude de l'influence du procédé de tissage sur les propriétés physiques (Titre) et mécaniques (ténacité à rupture) des fibres et des fils de sisal peut être menée pour des structures tissées 2D. La première étape pour la réalisation des structures tissées 2D consiste à concevoir le volume élémentaire représentatif de chaque architecture à l'aide du logiciel de modélisation géométrique des structures fibreuses (Wisetex). Six tissus 2D ont été divisées en deux classes d'architecture, le premier groupe (groupe A) correspond aux structures tissées 2D à faible densité de fils, tandis que le deuxième groupe (groupe B) est associé aux structures tissées 2D de forte densité des fils. L'entrelacement de fils pour chaque architecture a été décrit par une représentation 2D et 3D illustrée dans le Tableau II-19. La représentation 2D des tissus permet d'identifier le positionnement des fils de chaîne par rapport aux fils de trame : Lorsque le fil de chaîne passe au-dessus du fil de trame, il correspond à un pris (case colorée en noir ou remplie), tandis que lorsque le fil de chaîne passe au-dessous du fil de trame, il correspond à un laissé (case colorée en blanc ou vide). Pour la vue 3D des structures tissés 2D, les fils de chaîne sont de couleur bleue et les fils de trame de couleur rouge.

Tableau II-19: Architectures tissées 2D utilisées

Classification	Architectures	Représentation 2D	Représentation 3D
Groupe A	Natté 2-2		
	Croisé 2-2		
	Satin 4		
Groupe B	Natté 4-4		
	Croisé 4-4		
	Satin 8		

Après la conception et la fabrication des structures tissées 2D selon le procédé de tissage général décrit dans le chapitre précédent (section I.3.4.1). Le tissage des structures tissées 2D peut contribuer à la modification des propriétés des fils et des fibres de sisal.

II.4.1.1. Influence du procédé de tissage sur les propriétés des fils pour des structures tissées 2D

Généralement, les fils sont soumis à des fortes sollicitations mécaniques lors du procédé de tissage. La caractérisation des fils avant et après tissage permet d'évaluer le degré de dégradation du fil au sein de la structure tissée. Le titre des fils de sisal dans la direction chaîne

II. Étude des structures fibreuses de sisal aux échelles fibre et fil

et trame issus des différentes structures tissées 2D a été mesuré selon la norme NF G07-316 [169] en utilisant l'équation (II.20). La ténacité des fils de sisal dans la direction chaîne et trame a été calculée en testant les fils de sisal à l'aide du banc de traction MTS SYSTEM selon la norme ISO 2062 [179].

L'histogramme illustré dans la Figure II.25 montre que le titre du fil de sisal est modifié lors de tissage. Le frottement entre les fils de chaîne et les fils de trame contribue à la perte des fibrilles, ce qui engendre la perte en masse des fils. Le groupe A comportant les fils extraits des structures tissées 2D les moins denses présente une faible perte de fibrilles par rapport au groupe B comportant les fils extraits des structures tissées 2D les plus denses. L'armure croisé 2-2 représente la structure soumise aux sollicitations les plus élevées dans le groupe A lors du tissage, ce qui est remarqué au niveau du titre des fils de sisal dans les deux directions (chaîne et trame) avec une diminution du titre des fils de sisal dans la direction chaîne et trame de 14,24% et 12,12% respectivement. L'armure croisé 4-4 représente la structure soumise aux sollicitations les plus élevées dans le groupe B lors du tissage, ce qui est remarqué au niveau du titre des fils de sisal avec une diminution du titre des fils de sisal dans la direction chaîne et trame de 17,57% et 14,54% respectivement.

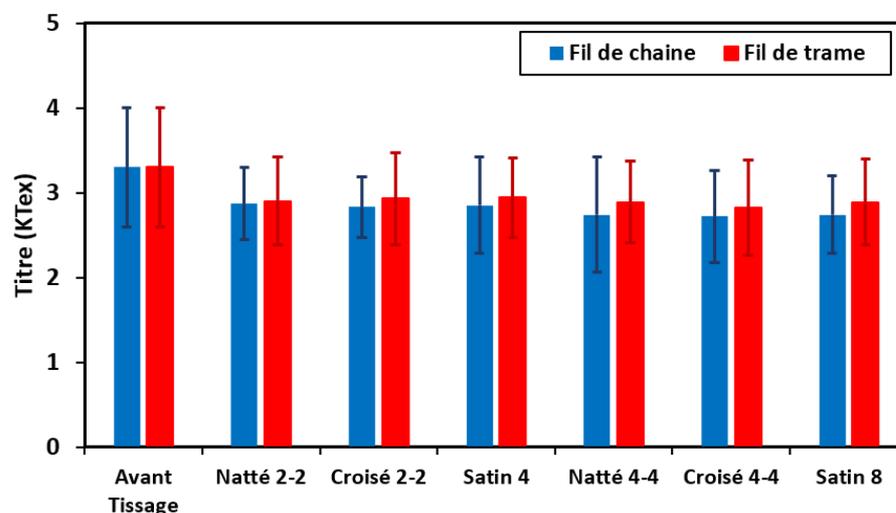


Figure II.25: Titre des fils de sisal lors du tissage des structures fibreuses 2D

La ténacité à rupture des fils de sisal dans la direction chaîne et trame est illustrée dans la Figure II.26 en comparaison avec la ténacité des fils de sisal avant tissage. Le tissage des fils de sisal ne modifie pas significativement la ténacité à rupture des fils de sisal dans la direction chaîne et trame. La ténacité à rupture après le tissage des fils de sisal n'est modifiée que moins

II. Étude des structures fibreuses de sisal aux échelles fibre et fil

de 5% par rapport à la ténacité à rupture avant le tissage des fils de sisal, contrairement aux travaux de Lee et al [118] qui ont montré que le tissage des fils de carbone contribue à la dégradation des propriétés mécaniques de 30 à 50 %. Il n'y a pas un grand écart entre la ténacité à rupture des fils de sisal dans la direction chaîne et la direction trame après tissage. La déformation à rupture des fils de sisal dans la direction chaîne et trame est donnée dans la Figure II.27. La déformation à rupture après le tissage des fils de sisal est supérieure de 11,9 à 37,65% par rapport à la déformation à rupture avant le tissage des fils de sisal. Cette différence observée sur la déformation après le tissage est attribuée aux ondulations des fils de sisal au sein des structures fibreuses 2D.

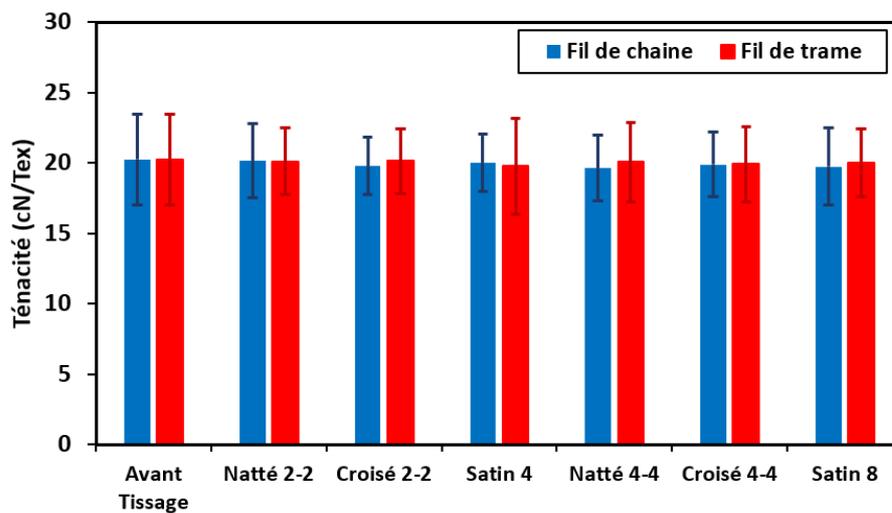


Figure II.26: Ténacité des fils de sisal après le tissage des structures tissées 2D

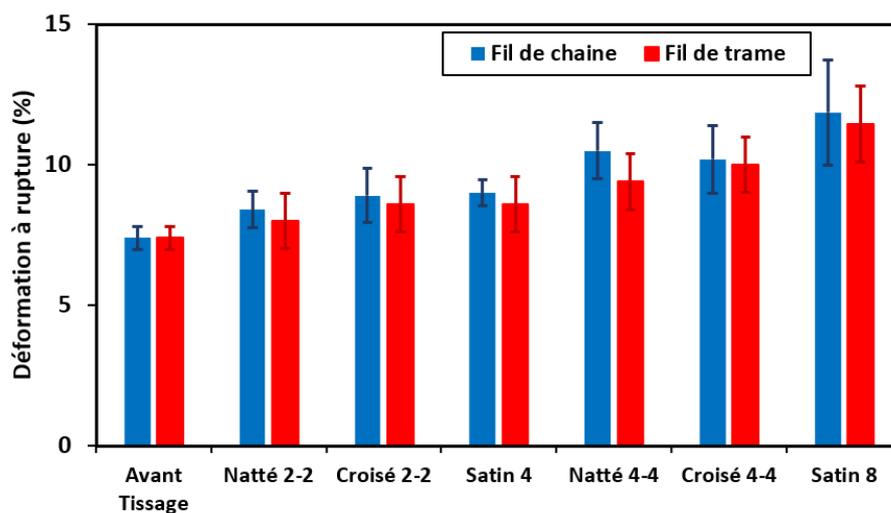


Figure II.27: Déformation à rupture des fils de sisal après le tissage des structures tissées 2D

II.4.1.2. Influence du procédé de tissage sur les propriétés des fibres pour des structures tissées 2D

L'impact du tissage sur les propriétés des fibres a été évalué à l'aide de la méthode IFBT (Impregnated Fiber Bundle Test) selon la norme ISO 10618 [165]. Les éprouvettes IFBT ont été réalisés sur les fils de sisal avant et après tissage. Les fils de sisal après tissage ont été extraits des structures tissées 2D selon la direction chaîne. Le protocole de réalisation IFBT (Impregnated Fiber Bundle Test) est similaire à celui décrit dans la section (II.2.6.2). Le Tableau II-20 illustre les différents paramètres (fraction volumique de fibres, de matrice et de porosités) des éprouvettes IFBT. La fraction volumique des fibres de sisal des éprouvettes réalisés IFBT (Impregnated Fiber Bundle Test) est compris entre 45% et 50 % avec un taux de porosités entre 2% et 6%.

Tableau II-20: Composition des éprouvettes IFBT conçues à partir des fils avant et après tissage

Architectures	Fraction Volumique de la fibre Vf (%)	Fraction Volumique de la matrice Vm (%)	Fraction Volumique de la porosité Vp (%)
Fil de sisal Avant Tissage	49,36	46,36	4,28
Fils extraits du Natté 2-2	45,2	51,9	2,9
Fils extraits du Croisé 2-2	49,32	45,79	4,89
Fils extraits du Satin 4	48,37	46,27	5,36
Fils extraits du Natté 4-4	48,69	47,82	3,49
Fils extraits du Croisé 4-4	48,58	46,83	4,59
Fils extraits du Satin 8	50,02	45,7	4,28

Les éprouvettes IFBT ont été placées dans une pièce conditionnée (20°C, 61%) avant de procéder à la caractérisation en traction. Les propriétés en traction ont été testées à l'aide de la machine de traction INSTRON 5985. Les modules en traction des fibres de sisal E_{f1} et E_{f2} ont été calculés, par méthode inverse, à l'aide du quatrième modèle de la loi des mélanges incluant le taux de porosités et les propriétés de fil à l'aide des équations ((II.15) et (II.17)). La Figure II.28 illustre l'évolution des valeurs des modules des fibres de sisal E_{f1} et E_{f2} avant et après

II. Étude des structures fibreuses de sisal aux échelles fibre et fil

tissage. Pour certaines architectures (croisé 2-2, croisé 4-4), les modules des fibres de sisal ont été augmentés après le tissage. Ce phénomène a été également observé dans la littérature [182], ce qui est attribué à la rigidification des fibres lors du tissage des fils de sisal. Cette rigidification est due à l'ondulation résiduelle des fils lors du tissage et aux tensions appliquées sur les fils de chaîne.

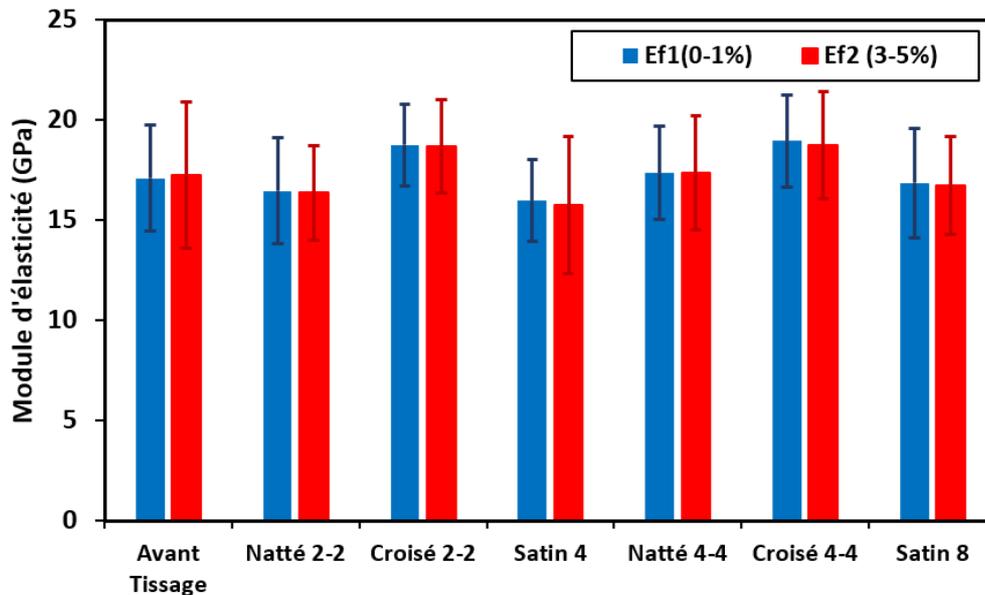


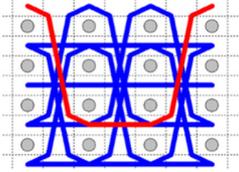
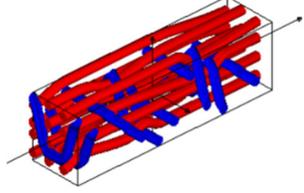
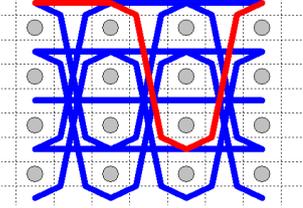
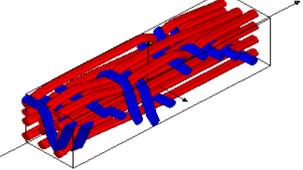
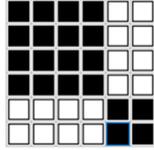
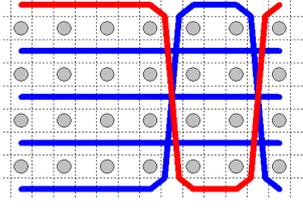
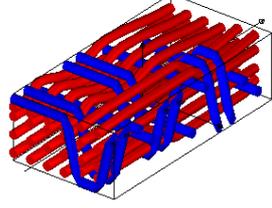
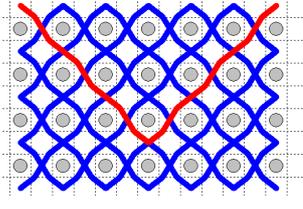
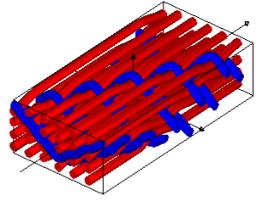
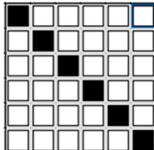
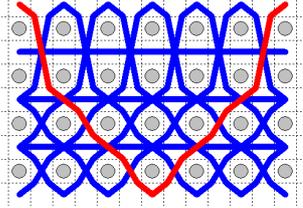
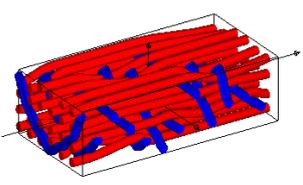
Figure II.28: Modules d'élasticité des fibres avant et après tissage des structures fibreuses 2D

II.4.2. Influence du procédé de tissage sur les propriétés des fils et des fibres pour des structures tissées 3D

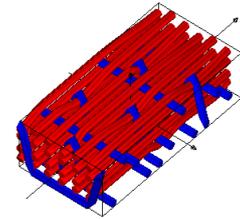
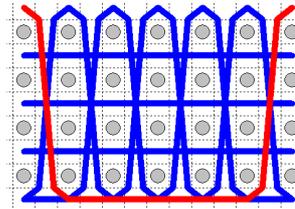
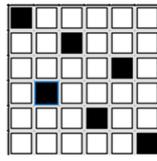
Après la production des tissus 2D, des structures tissées 3D interlocks chaînes ont été conçues et dont les représentations, à l'aide du logiciel de modélisation géométriques (Wisetex) permettent de décrire le positionnement de chaque type de fil au sein de ces tissus 3D interlocks chaînes. Six architectures ont été élaborées selon la classification générale des structures tissées 3D interlocks chaînes [103]. Les propriétés des fils et des fibres de sisal ont été évaluées après le tissage des structures fibreuses 3D interlocks chaînes afin d'identifier leur degré de dégradation. Le Tableau II-21 illustre la coupe transversale et la représentation 3D des structures tissées 3D interlocks chaînes. Les fils de chaîne ont été identifiés par la couleur bleue, tandis que les fils de trame ont été identifiés par la couleur rouge dans les représentations 3D.

II. Étude des structures fibreuses de sisal aux échelles fibre et fil

Tableau II-21: Coupe transversale et représentation 3D des structures fibreuses 3D

Architectures	Armure des fils de liage	Coupe Transversale	Représentation 3D
<p>TISSU 3D INTERLOCK O-L 4 2-3 LIAGE {SERGE 3 EFFET TRAME CORDON A GAUCHE}{1 5 9 - 2 6 10 - # - # - #} -RENFORT {# - 3 8 - 4 11 - 7 12 - #}</p>			
<p>TISSU 3D INTERLOCK O-L 4 1-3 LIAGE { SERGE 3 EFFET TRAME CORDON A GAUCHE }{1 5 9 - 2 6 10- # - # - #} -RENFORT {# - 3 8 - 4 11 - 7 12 - #}</p>			
<p>TISSU 3D INTERLOCK O-T 4 2-4 LIAGE {NATTE 4-2}{1 2 5 6 9 10 -# - # - # - #} - RENFORT {# - 3 8 - 4 11 - 7 12 - #}</p>			
<p>TISSU 3D INTERLOCK A-L 4 5-3 LIAGE {SERGE 6 EFFET TRAME CORDON A GAUCHE } {1 3 5 7 9 11 - 2 4 6 8 10 12 - # - # - # - # - #}</p>			
<p>TISSU 3D INTERLOCK A-T 4 5-4 LIAGE {SERGE 6 FAÇONNE } {1 2 5 6 9 10 - # - # - # - #} -RENFORT {# - 3 8 - 4 11 - 7 12 - #}</p>			

TISSU 3D INTERLOCK
O-T 4 5-4 LIAGE
{SERGE 6 FAÇONNE
1P5L-3L1P2L } {1 2 5
6 9 10 -- # - # - # - #} -
RENFORT {# - 3 8 - 4
11 - 7 12 - #}



II.4.2.1. Influence du procédé de tissage sur les propriétés des fibres pour des structures tissées 3D

Les propriétés physiques et mécaniques des fils de sisal dans la direction chaîne et trame des structures tissées 3D ont été évaluées selon la norme NF G07-316 [169] et la norme ISO 2062 [179] respectivement. Les structures fibreuses 3D produites représentent des structures multicouches avec une insertion des fils de chaîne à travers l'épaisseur, ce qui entraîne un frottement important entre les fils de chaîne et les fils de trame. Les fils de chaîne de liage et les fils de trame ont été extraits des structures 3D produites afin d'évaluer l'influence du tissage sur leur performance mécanique. Le frottement entre les fils de chaîne et les fils de trame a engendré une perte de masse des deux fils. Les fils de chaîne sont les plus influencés par le frottement entre fils lors du tissage, ce qui est identifié dans la Figure II.29. Le titre des fils de chaîne lors du tissage des structures tissées 3D passe de 16,3 à 20,6% de réduction, tandis que le titre des fils de trame lors du tissage est réduit de 10,3 à 11,81%. L'intervalle de variation des valeurs de titre des fils de sisal avant et après tissage est principalement due à la variabilité des propriétés des fibres de sisal.

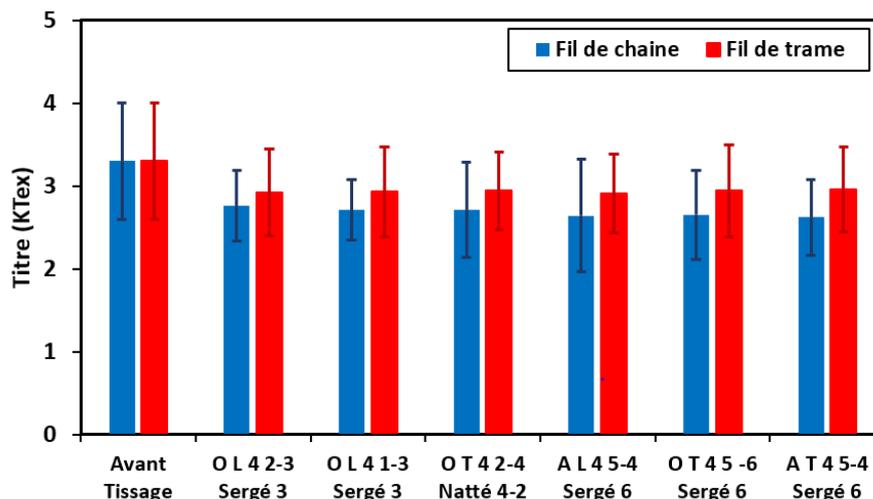


Figure II.29: Titre des fils de sisal lors du tissage des structures tissées 3D

II. Étude des structures fibreuses de sisal aux échelles fibre et fil

Les fils de sisal sont soumis à différents types de sollicitations en fonction de leur position à l'intérieur de la structure. Cela entraîne une dégradation de leurs propriétés mécaniques, notamment de leur résistance à la rupture. Afin de vérifier et de mesurer cette réduction de résistance, les différents fils de sisal, les fils de chaîne et les fils de trame, ont été soumis à un essai de traction.

La ténacité des fils de chaîne de liage après tissage est réduite de 9,3 à 16,1 %, tandis que la ténacité des fils de trame après tissage est réduite de 6,47 à 13,53 % (Figure II.30). Ces résultats montrent que les fils de chaîne sisal sont plus endommagés que les fils de trame. Cette différence peut s'expliquer par la différence relative du mouvement du fil et les sollicitations supplémentaires pendant le mouvement de la foule lors du tissage. La dégradation des propriétés mécaniques des fils lors du tissage des structures fibreuses 3D a été également observée dans la littérature [4], [118], [120]. La ténacité des fils de carbone dans les directions chaîne et trame a été réduite de 12% et de 7% respectivement lors du tissage des structures fibreuses 3D [118].

La déformation à rupture des fils de sisal après tissage des structures tissées 3D est illustrée en Figure II.31. La déformation des fils de chaîne de liage et des fils de trame après tissage a augmenté de 34,16 à 45,75 % et de 26,22 à 33,45 % respectivement. Cette modification est liée à l'insertion des fils de chaîne de liage à travers l'épaisseur, ce qui conduit à une plus grande ondulation des fils de chaîne de liage qui se répercute sur les fils de trame.

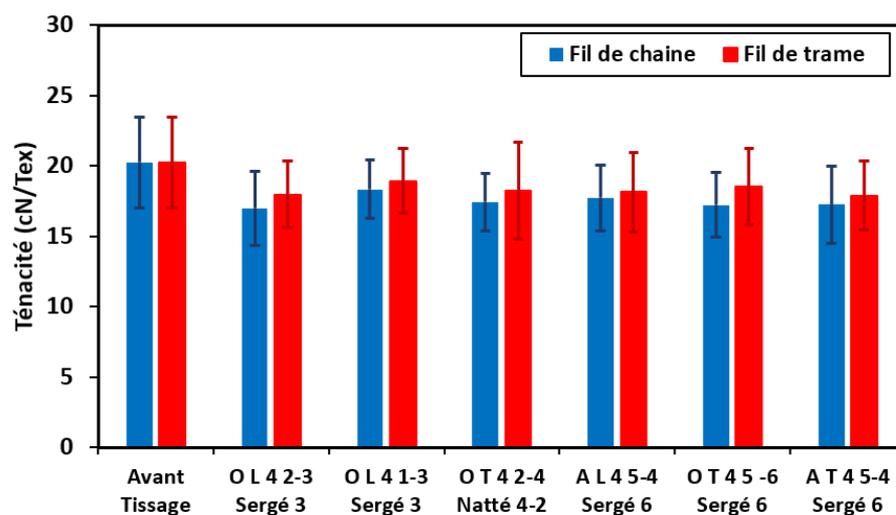


Figure II.30: Ténacité des fils de sisal après le tissage des structures tissées 3D

II. Étude des structures fibreuses de sisal aux échelles fibre et fil

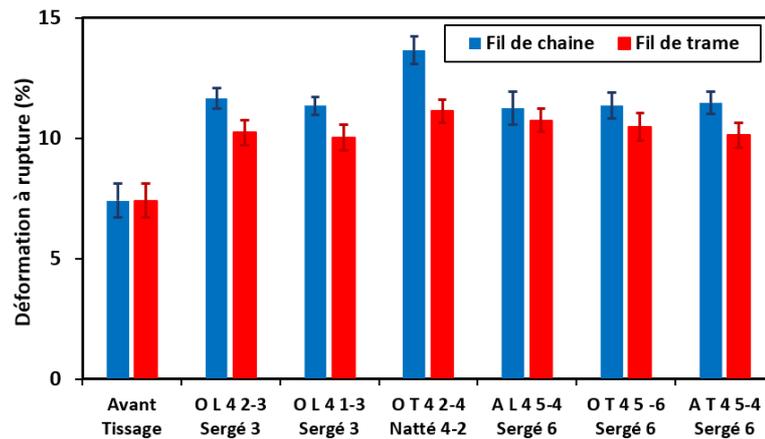


Figure II.31: Déformation à rupture des fils de sisal après le tissage des structures tissées 3D

II.4.2.2. Influence du procédé de tissage des structures tissées 3D sur les propriétés des fibres

L'influence du tissage des structures 3D Interlock chaîne sur les propriétés des fibres a été évaluée selon la méthode IFBT (Impregnated Fiber Bundle Test) en suivant le même protocole d'évaluation de l'impact du tissage des structures tissées 2D sur les propriétés des fibres (section (II.4.1.2)). Le Tableau II-22 résume la constitution des éprouvettes IFBT. La fraction volumique des fibres de sisal des éprouvettes IFBT (Impregnated Fiber Bundle Test) réalisées est compris entre 46% et 51 % avec un taux de porosités entre 3% et 5%.

Tableau II-22: Composition des éprouvettes IFBT conçues à partir de fils avant et après tissage des structures 3D Interlock chaîne

Architectures	Fraction Volumique de la fibre Vf (%)	Fraction Volumique de la matrice Vm (%)	Fraction Volumique de la porosité Vp (%)
Fil de sisal Avant Tissage	49,36	46,36	4,28
O L 4 2-3 Sergé 3	47,36	48,28	4,36
O L 4 1-3 Sergé 3	48,36	46,42	5,22
O T 4 2-4 Natté 4-2	49,32	46,99	3,69
A L 4 5-4 Sergé 6	50,26	45,54	4,2
O T 4 5-6 Sergé 6	49,48	46,72	3,8
A T 4 5-4 Sergé 6	51,6	44,92	3,48

La Figure II.32 illustre l'évolution des modules en traction, E_{f1} et E_{f2} , des fibres de sisal au sein des fils avant et après tissage des structures 3D. Ces modules ont été calculés, par méthode

II. Étude des structures fibreuses de sisal aux échelles fibre et fil

inverse, à l'aide du quatrième modèle de la loi des mélanges incluant le taux de porosités et les propriétés de fil à l'aide des équations ((II.15) et (II.17)). Pour certaines architectures (O L 4 1-3 Sergé 3, O T 4 5 -6 Sergé 6), les modules des fibres de sisal ont été augmentés après le tissage. Cette rigidification des fibres peut être attribuée à l'évolution des fils de chaîne de liage à travers l'épaisseur et orthogonalement, ce qui augmente l'ondulation des fils de sisal dans la direction chaîne. Pour les autres architectures, la dégradation des fils de sisal a entraîné la diminution du module en traction des fibres de sisal.

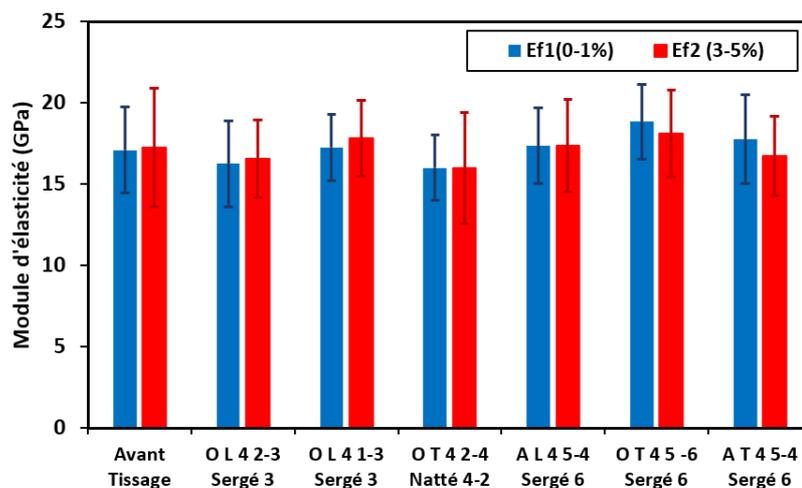


Figure II.32: Modules d'élasticité des fibres de sisal après le tissage des structures fibreuses 3D

II.5. Conclusion

Dans ce chapitre, les structures fibreuses ont été étudiées aux échelles fibre et fil pour comprendre la complexité de ces structures. Cette étude a été complétée par l'impact, sur les propriétés à ces échelles fibres et fils, du procédé de tissage lors de l'élaboration de tissus 2D et 3D Interlock chaîne.

En premier lieu, les structures fibreuses issues des tissus 2D et 3D ont été étudiées à l'échelle fibre. Le potentiel textile de la fibre de sisal a été évalué en identifiant les différentes propriétés de la fibre selon les normes standard. Les propriétés morphologiques de la fibre de sisal ont été déterminées en mesurant la longueur et le diamètre de la fibre et en analysant la morphologie de la surface de la fibre de sisal. Une variabilité de la longueur et du diamètre de la fibre de sisal a été observée en fonction des conditions climatiques et du lieu de plantation. La nature

II. Étude des structures fibreuses de sisal aux échelles fibre et fil

lisse de la surface de la fibre de sisal dépend de la présence des cires et des matières gommeuses. Ensuite, les propriétés physiques de la fibre de sisal ont montré la nature hydrophile de la fibre de sisal et sa faible densité. La composition chimique de la fibre de sisal a été déterminée à l'aide de la spectroscopie infrarouge. La structure de la fibre de sisal comporte des composants cellulosiques (cellulose) et non cellulosiques (hémicellulose, lignine). Puis, la dégradation thermique de la fibre de sisal a été étudiée à l'aide de l'analyse thermogravimétrique. La fibre de sisal présente une sensibilité thermique qui est un facteur important pour la mise en œuvre des matériaux composites. La performance mécanique de la fibre de sisal a été ensuite évaluée pour montrer le potentiel de la fibre de sisal comme fibre végétale pour le renforcement des matériaux composites. Les propriétés en traction de la fibre de sisal ont été déterminées à l'aide de l'essai unitaire et l'essai IFBT (Impregnated Fibre Bundle Test). Les propriétés en traction de la fibre de sisal d'origine marocaine présentent de bonnes propriétés en traction en comparaison avec les fibres de sisal provenant de différents lieux de plantation (Inde, Mexique).

En second lieu, les structures fibreuses issues des tissus 2D et 3D ont été étudiées à l'échelle fil. Le fil de sisal étudié est un fil tordu dans le sens Z (Référence 300/1 (m/kg)) commercialisé par la société marocaine SONAJUTE. Les propriétés morphologiques, physiques et mécaniques du fil de sisal ont été analysées selon les normes standard. La variabilité des propriétés morphologiques du fil de sisal dépend de la variabilité du diamètre et de la longueur de la fibre de sisal. Ensuite, les propriétés physiques du fil de sisal ont été déterminées en mesurant le titre et la torsion du fil de sisal. L'angle de torsion du fil de sisal dépend du facteur de compaction et du diamètre du fil. Puis, les propriétés en traction du fil de sisal ont été analysées en déterminant sa ténacité. Le comportement observé du fil de sisal d'origine marocaine est similaire à celui du fil de sisal issu d'autres origines.

En dernier lieu, les architectures 2D et 3D ont été conçues à l'aide du logiciel modélisation géométrique (Wisetex). Ensuite, l'influence du procédé de tissage sur les propriétés du fil et de la fibre a été étudiée lors de l'étude des structures fibreuses extraites de ces structures tissées 2D et 3D. Les fils extraits des tissus 2D ont subi une perte en masse et une légère dégradation de leur ténacité. Tandis qu'à l'échelle fibre, une rigidification de la fibre a été observée à cause des points de compression locaux liés aux points de liage. Le tissage des structures fibreuses 3D a contribué à une forte perte en masse du fil de sisal en vue de la nature multicouche de ces structures et à une dégradation de la ténacité du fil allant jusqu'à 16%. Afin d'analyser le comportement des structures fibreuses 2D et 3D à base des fils de sisal, la caractérisation à

II. Étude des structures fibreuses de sisal aux échelles fibre et fil

l'échelle tissu, présentée dans le chapitre suivant, permettra d'évaluer leur potentiel en tant que structure de renforcement pour des matériaux composites.

III. Étude des structures fibreuses de sisal à l'échelle tissu

III.1. Introduction

Les structures tissées à base de fibres naturelles peuvent être conçues et fabriquées suivant le procédé de tissage existant à l'échelle industrielle. Les structures tissées se présentent sous formes bidirectionnelles ou tridirectionnelles. Le comportement des structures tissées dépend généralement du type d'architecture, du type de fil utilisé et du procédé de fabrication.

Après l'étude des structures fibreuses extraites des structures tissées à l'échelle fibre et à l'échelle fil dans le chapitre précédent, l'étude de ces structures tissées fait l'objet des travaux présentés dans ce chapitre. Dans un premier temps, ce chapitre portera sur l'étude des structures tissées bidirectionnelles 2D par la description des architectures conçues, la description du procédé de tissage et la caractérisation des propriétés textiles et mécaniques de ces structures 2D. Ensuite, les structures tissées tridirectionnelles sont étudiées en suivant la même démarche que pour l'étude des structures tissées bidirectionnelles 2D.

III.2. Étude des structures tissées bidirectionnelles 2D

III.2.1. Conception des structures tissées bidirectionnelles 2D

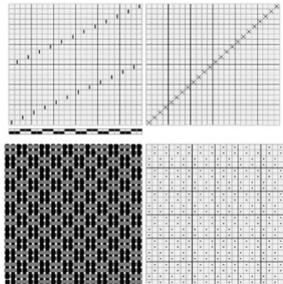
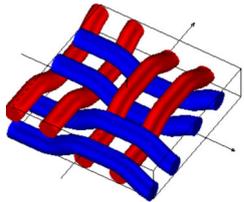
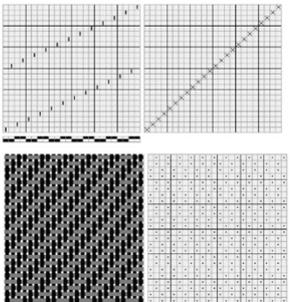
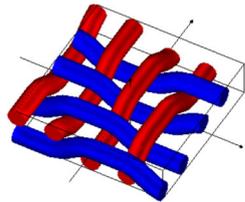
Les structures tissées bidirectionnelles 2D présentent un entrelacement entre les fils positionnés dans la direction chaîne (0°) et ceux dans la direction trame (90°). Les modèles géométriques des structures tissées 2D peuvent être décrits à l'aide des logiciels de modélisation de type : Wisetex (Wisetex suite, Univ. KU Leuven, <https://www.mtm.kuleuven.be/onderzoek/scalint/Composites/software/wisetex>) ou Texgen (Texgen, Univ. Nottingham UK http://texgen.sourceforge.net/index.php/Main_Page). Ensuite, la carte générale de chaque structure tissée 2D ou 3D est définie à l'aide du logiciel DB Weave (DB weave software, <https://www.brunoldsoftware.ch/dbw.html>). Cette carte générale comprend le type de rentrage des fils, la carte de perçage et l'armure du tissu. Six architectures de structures tissées bidirectionnelles 2D ont été conçues et réalisées sur la même machine à tisser selon le même plan de rentrage. Le plan de rentrage sauté a été choisi pour optimiser le montage des fils

III. Étude des structures fibreuses de sisal à l'échelle tissu

de chaîne. Cette optimisation a permis de minimiser le frottement entre les fils de chaîne en raison de la valeur élevée de la pilosité et du titrage des fils de sisal. En procédant ainsi, les mêmes paramètres du procédé de tissage sont appliqués et ne seront pas déterminants sur les modifications des propriétés finales des différentes architectures tissées. Les architectures ont été classées en deux groupes ; le premier groupe (A) comporte les structures tissées les moins denses avec les armures suivantes : Natté 2-2, Croisé 2-2, Satin 4. Le deuxième groupe (B) comporte les structures tissées 2D les plus denses avec les armures suivantes : Natté 4-4, Croisé 4-4, Satin 8.

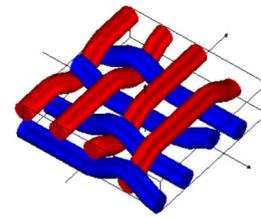
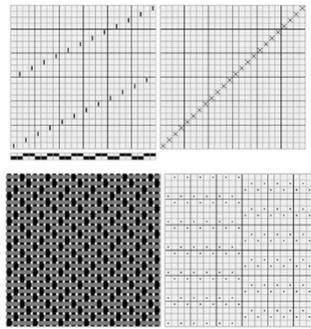
La modélisation géométrique des structures tissées 2D permet de décrire l'arrangement des fils par l'identification du positionnement des fils de chaîne par rapport aux fils de trame selon 1 seule couche de tissu. Tandis que, la représentation 3D permet de visualiser l'entrelacement des fils de chaîne (couleur bleue) et des fils de trame (couleur rouge) selon plusieurs couches du tissu. Le Tableau III-1 représente les deux groupes de structures tissées 2D.

Tableau III-1: Représentation 2D et 3D des structures fibreuses tissées 2D

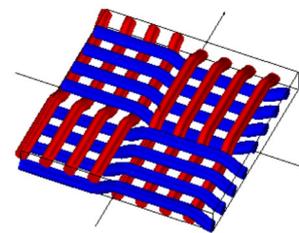
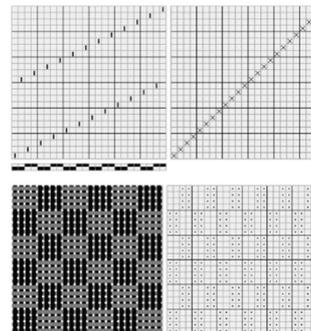
Classification	Armure	Carte Générale de la structure tissée (logiciel DB Weave)	Représentation 3D du motif élémentaire tissé (logiciel Wisetex)
Groupe A	Natté 2-2		
	Croisé 2-2		

III. Étude des structures fibreuses de sisal à l'échelle tissu

**Satin 4
effet trame**

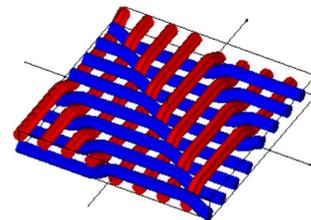
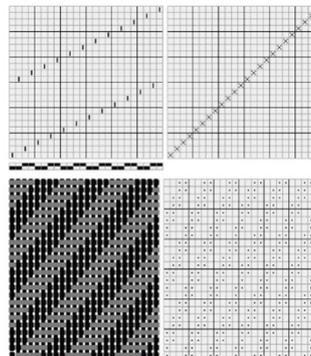


Natté 4-4

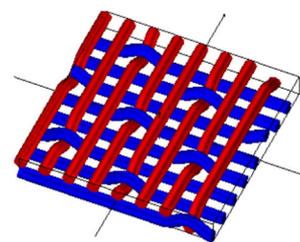
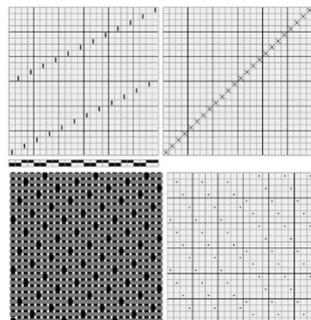


Groupe B

Croisé 4-4



**Satin 8 effet
trame
décochement
de 3**



III.2.2. Procédé de tissage des structures tissées bidirectionnelles 2D

La fabrication des structures tissées 2D à base des fils de sisal, présentés dans le chapitre

III. Étude des structures fibreuses de sisal à l'échelle tissu

précédent, peut s'effectuer selon le procédé de tissage conventionnel. Comme abordé dans le chapitre I (Etat de l'art, section I.3.4.1), le procédé de tissage s'appuie sur différentes étapes : de la préparation des fils de chaîne jusqu'à l'étape de tissage.

La préparation des fils de chaîne a consisté préalablement à déterminer le nombre des ensouples des fils de chaîne selon les propriétés physiques du fil de sisal (allocation d'une ensouple par cadre, densité des fils de chaîne, laize du tissu...).

La densité des fils de chaîne/cm a été déterminée en fonction du diamètre des fils et de la densité du peigne. La géométrie des fils a été considérée parfaitement circulaire pour identifier l'espace occupé par fil par unité de longueur, ici le centimètre. La réduction des fils de chaîne a été déterminée à 2 fils/cm. La densité chaîne maximale des fils de sisal a été calculé de la façon suivante :

Deux fils de chaîne occupent un espace équivalent à 4 fois le diamètre d du fil de sisal ($2,03 \pm 0,98$ mm (Tableau II-15)) (d). X fils de chaîne occupent un espace équivalent à 10 mm (1 cm). Il ressort de l'équation (III.1) une valeur de 2,46 fils/cm :

$$X = \frac{(2 \times 10)}{4d} = \frac{5}{d} \text{ avec } X = 2,46 \text{ fils/cm} \quad (\text{III.1})$$

Si l'on considère que le peigne représente 20% de l'espace occupé, il reste donc 80% d'espace disponible pour les fils de chaîne, donc : $X_1 = 0,80 \times X = 1,97$ fils/cm que l'on peut arrondir à 2 fils/cm, donc la densité des fils de sisal est de 2 fils de chaîne/cm.

Pour une étude comparative des propriétés des structures tissées 2D, les différentes architectures ont été conçues et produites selon le même montage. Le raccord d'armure en largeur a été choisi par rapport aux armures du groupe B (Tableau III-1). Ainsi, en considérant une laize de 48 cm (largeur maximale de 50 cm sur machine à tisser d'échantillonnage et largeur suffisante pour la réalisation de différents coupons à tester), nous avons proposé de réaliser 8 ensouples différentes qui seront associées à différents cadres de la machine à tisser. La machine à tisser utilise pour la production des structures tissées 2D les 24 cadres disponibles, ce qui permet d'associer chaque ensouple à 3 cadres différents. De ce fait, le nombre total de fils de chaîne est de 2 fils/cm \times 48 cm de laize = 96 fils de chaîne.

III. Étude des structures fibreuses de sisal à l'échelle tissu

III.2.2.1. Encantrage et ourdissage des fils de chaîne

La première étape consiste à placer douze bobines dans le cantre comme illustré en Figure III.1(A). Chaque bobine de fil contient la longueur minimale nécessaire pour réaliser le montage sur machine à tisser et la production des 6 architectures des tissus (Tableau III-1). Ainsi, la quantité prélevée, dans chaque bobine, en longueur initiale de fil a pu être optimisée lors de l'étape de bobinage des 12 bobines de fil de chaîne. La deuxième étape a permis de relier les 12 fils de chaîne à chaque ensouple placée sur l'ourdissage d'échantillonnage Suzuki NAS-5S (Figure III.1(B)). La longueur des fils a été recalée en considérant un nombre entier de fois la valeur du périmètre du tambour de l'ourdissage (ici 5 mètres). Afin d'assurer un espacement le plus régulier des fils de chaîne sur l'ensouple, nous avons utilisé un peigne « miseur » (Figure III.1(C)). Une tension de 40 cN a été appliquée sur les fils de chaîne de sisal lors de leur enroulement sur les ensouples par un système de contrepoids. Huit ensouples ont été préparées avec une laize de 48 cm, puis ont été placées sur le cantre dédié aux ensouples de la machine à tisser (machine d'échantillonnage ARM).

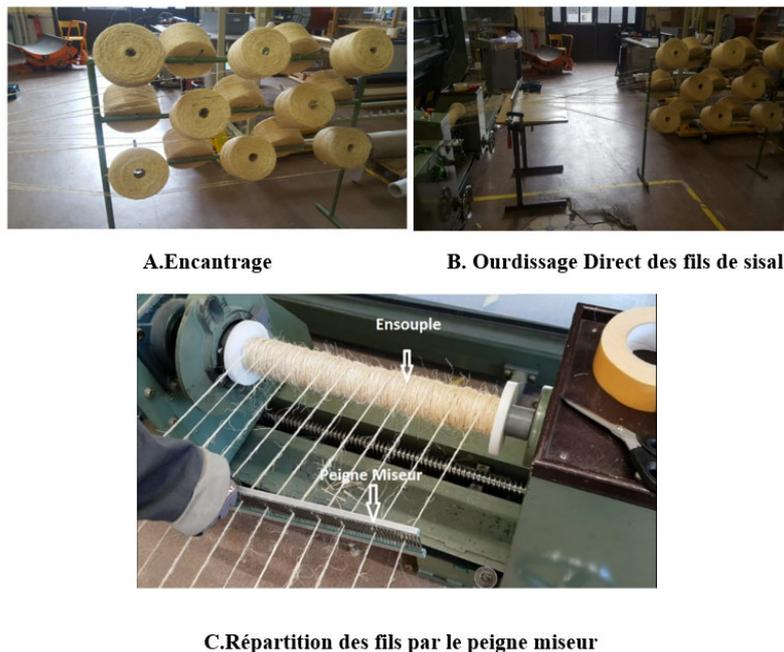


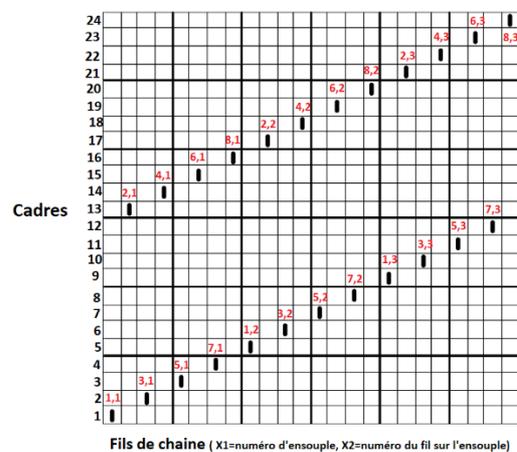
Figure III.1: A. Encantrage, B. Ourdissage Direct des fils de sisal et C. Répartition des fils par le peigne miseur

III.2.2.2. Rentrage et piquage des fils de chaîne

Après le positionnement des ensouples sur le cantre associé à la machine à tisser d'échantillonnage ARM du laboratoire GEMTEX, nous avons procédé à l'étape de rentrage.

III. Étude des structures fibreuses de sisal à l'échelle tissu

L'étape de rentrage consiste à positionner les fils de chaîne issus des différentes ensouples, au sein de chaque cadre dans un ordre déterminé par le repérage des fils de chaîne au sein de la croisure. Le positionnement des fils de chaîne au sein de chaque cadre s'effectue par insertion dans les œillets de chaque lisse en suivant le plan de rentrage défini au moment de la conception des structures tissées 2D à l'aide du logiciel DB Weave (rentrage sauté (Figure III.2)). Le rentrage a été effectué sur 24 cadres, chaque cadre comportant 4 lisses. Ensuite, les fils de chaîne sont passés individuellement dans le peigne de 500 mm avec une densité de 2 fils par cm (piquage en peigne (Figure III.3)). Après le piquage, les fils ont été noués sur le rouleau d'appel de la machine à tisser afin de maintenir la tension des fils de chaîne.



A. Rentrage sauté



B. Rentrage des fils de sisal

Figure III.2: Rentrage des fils de chaîne de sisal

III. Étude des structures fibreuses de sisal à l'échelle tissu



Figure III.3: Piquage au peigne des fils de chaîne de sisal

III.2.2.3. Tissage

Après les étapes de préparation au tissage, le tissage a été réalisé à l'aide de la machine ARM d'échantillonnage présentée en Figure III.4. Le tissage s'effectue sur une zone située entre un ensemble de fils de chaîne, disposés parallèlement entre eux sur une ensouple avec une tension constante, et un rouleau d'appel entraînant le tissu. Trois opérations principales sont réalisées dans cette zone : une opération de sélection des fils de chaîne permettant l'ouverture de la foule (séparation en deux parties distinctes de l'ensemble des fils de chaîne), suivi d'une insertion du fil de trame, au sein d'une bobine, par une navette et par la suite une opération de positionnement du fil de trame inséré dans la structure tissée au plus près de la ligne de formation du tissu (ligne de formation du tissu) par tassage du peigne. Le tissage réalisé à l'échelle laboratoire, par le tassage manuel du fil de trame, conduit à fabriquer des structures tissées dont la régularité en termes de densité des fils de trame est dépendante de la force de tassage de l'opérateur.

III. Étude des structures fibreuses de sisal à l'échelle tissu



Figure III.4: Machine à tisser ARM d'échantillonnage

III.2.3. Caractérisation des structures tissées bidirectionnelles 2D

Au préalable des tests de caractérisation, les structures tissées 2D à base de fils de sisal (Figure III.5) ont été conditionnées sous atmosphère contrôlée ($20 \pm 2,0^\circ\text{C}$, $65 \pm 4,0\%$) selon la norme ISO 139 [183]. Les différentes propriétés (structurelles, mécaniques) des structures tissées 2D ont été étudiées pour mieux en comprendre leur comportement en fonction de l'armure tissée.



Figure III.5: Vues d'endroit des structures tissées 2D produites

III.2.3.1. Propriétés structurelles des structures tissées bidirectionnelles 2D

Les propriétés structurelles des tissus 2D permettent de décrire l'ondulation et l'arrangement des fils au sein de ces structures en déterminant la densité chaîne et trame, l'embuvage, le retrait, l'épaisseur et la masse surfacique.

III. Étude des structures fibreuses de sisal à l'échelle tissu

III.2.3.1.1. Densité chaîne et trame

La densité correspond au nombre de fils par unité de longueur dans les structures tissées 2D, elle est identifiée après tissage et selon la norme ISO 4602 [184]. La densité des fils dans les directions chaîne et trame pour chaque structure tissée 2D a été mesurée à partir de dix échantillons. Le Tableau III-2 précise les valeurs moyennes et écart types des densités chaîne et trame des structures tissées 2D. Le groupe A contient les structures tissées 2D avec une plus faible densité que celles du groupe B. La densité chaîne et trame des structures tissées 2D dépend du type de l'armure et du procédé de tissage. La structure tissée satin 8 présente des valeurs de densité des fils de chaîne et trame les plus élevées, ce qui peut être expliqué par le fait que c'est l'armure qui possède le plus faible nombre de points de liage et par la position la plus espacée entre les points de liage. Ainsi, les forces appliquées par les tensions des fils de chaîne et trame, respectivement permettent aux fils de se rapprocher les uns des autres lorsqu'ils sont éloignés des points de liage. Les différences obtenues au niveau des densités en fils de trame sont principalement liées à la régularité des forces appliquées par le tisserand lors de l'étape de tassage des fils de trame insérés. Initialement, la valeur de réduction chaîne sur machine à tisser (juste en sortie de peigne) est de 2 fils/cm et correspond à une valeur calculée pour une armure toile qui possède le plus grand nombre de points de liage à iso-densités des fils chaîne et trame. Pour les armures du groupe A, les valeurs de densité chaîne sont statistiquement identiques et proches de la valeur initiale fixée ce qui traduit une très faible mobilité des fils de chaîne au sein de la structure tissée. Pour les armures du groupe B, les valeurs mesurées de densité chaîne révèlent un repositionnement des fils de chaîne en sortie de machine à tisser.

Tableau III-2: Densité chaîne et trame des structures tissées 2D à base de fils de sisal

Classification	Armures	Densité chaîne (fils/cm)	Densité trame (fils/cm)
Groupe A	Natté 2-2	2,0±0,5	2,5±0,7
	Croisé 2-2	2,0±0,4	1,0±0,3
	Satin 4	2,0±0,35	2,0 ±0,45
Groupe B	Natté 4-4	3,2±0,23	3,0 ±0,31
	Croisé 4-4	3,2±0,26	3,0 ±0,34
	Satin 8	3,4 ± 0,65	4,0 ± 0,49

III. Étude des structures fibreuses de sisal à l'échelle tissu

III.2.3.1.2. Embuvage et retrait

L'entrelacement entre les fils de chaîne et de trame au sein de la structure tissée conduit à une consommation en longueur des fils. Cette différence de longueur est représentée par l'embuvage pour les fils de chaîne et le retrait pour les fils de trame. La détermination de l'embuvage et du retrait est basée sur la mesure de la longueur des fils au sein de la structure (L_a) et de la longueur réelle des fils (L_r) en utilisant un maillemètre. L'embuvage et le retrait ont été déterminés selon la norme ISO 7211-3 [185] en utilisant l'équation suivante :

$$\text{Embuvage ou Retrait} = \frac{L_r - L_a}{L_r} \times 100 \quad (\text{III.2})$$

Les Figure III.6 et Figure III.7 illustrent les valeurs d'embuvage et de retrait des fils de sisal au sein des structures tissées 2D. La similarité des valeurs d'embuvage et de retrait des fils de sisal au sein des structures tissées natté 2-2 et natté 4-4 caractérise des structures équilibrées avec les mêmes formes d'ondulation des fils de sisal dans les deux directions chaîne et trame. Tandis que, les fils de sisal au sein des structures tissées croisé 2-2 et croisé 4-4 ne sont pas consommés de la même façon dans les deux directions chaîne et trame. Les fils de sisal dans la direction chaîne ont été plus sollicités lors du tissage, contrairement aux fils de sisal dans la direction trame. Les faibles valeurs d'embuvage et de retrait des fils de sisal au sein des structures tissées satin 4 et satin 8 dépendent du type d'armure de ces structures qui tend à éloigner les points de liage de façon régulière au sein de la structure tissée. Ainsi, les tensions appliquées sur les fils sont mieux réparties sur les fils qui flottent et minimisent la longueur consommée des fils de chaîne et trame.

III. Étude des structures fibreuses de sisal à l'échelle tissu

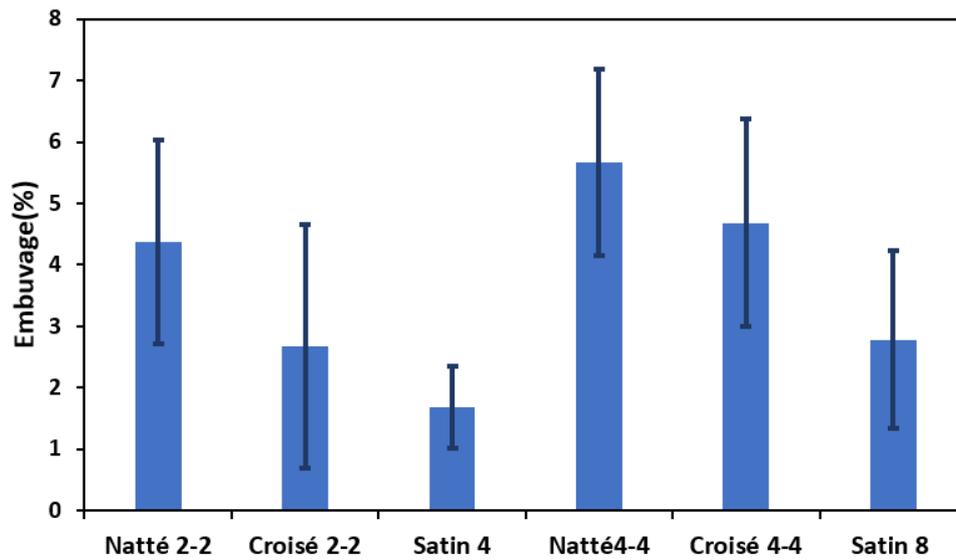


Figure III.6: Embuage des fils de sisal au sein des structures tissées 2D

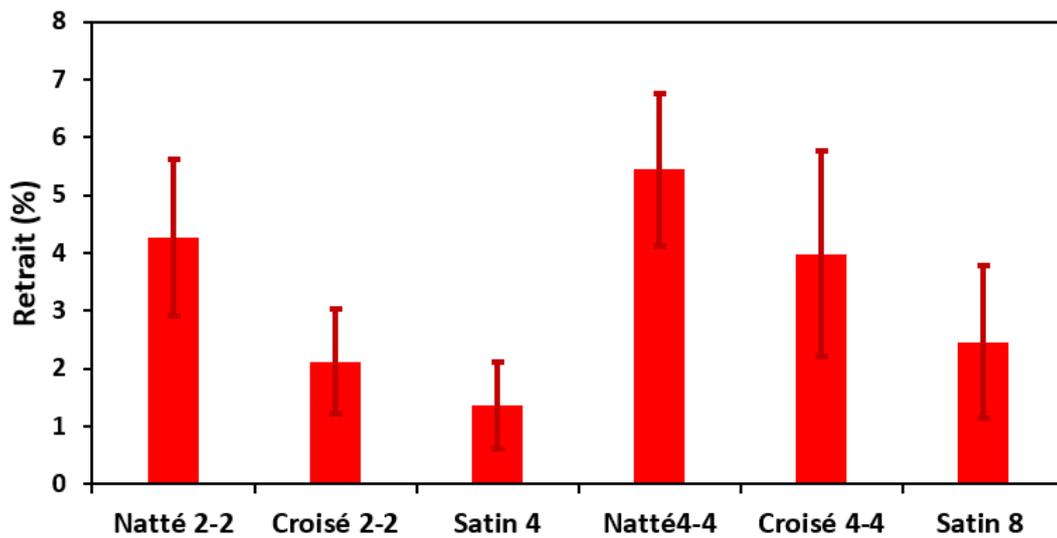


Figure III.7: Retrait des fils de sisal au sein des structures tissées 2D

III.2.3.1.3. Épaisseur

L'épaisseur des structures tissées 2D réalisées a été mesurée à l'aide du pied presseur SODEMAT avec une pression nominale de 1 KPa selon la norme NF EN ISO 5084 [186]. La mesure a été effectuée sur cinq échantillons de $120 \times 120 \text{ mm}^2$ découpés à l'aide d'un emporte-pièce.

La Figure III.8 représente la valeur moyenne de l'épaisseur et son écart type des différentes structures tissées 2D à base de fils de sisal. A titre de fils équivalent, l'épaisseur des structures tissées 2D dépend du type d'armure et du procédé de tissage, notamment de l'opération du

III. Étude des structures fibreuses de sisal à l'échelle tissu

tassage du fil de trame. Les structures tissées 2D appartenant au groupe A (natté 2-2, croisé 2-2, satin 4) ont une épaisseur similaire, ce qui est justifié par la densité moyenne des fils de ces structures qui contribue au positionnement des fils côte à côte lors du tissage des fils de trame. L'épaisseur des structures tissées 2D appartenant au groupe B varie en fonction du type d'armure. La structure tissée natté 4-4 possède la valeur la plus élevée de l'épaisseur des structures tissées 2D ce qui est attribué à la position des points de liage selon la même direction du fil de trame. Les valeurs de l'épaisseur des structures tissées 2D du groupe B sont différentes par rapport à celles des structures tissées 2D du groupe A, ce qui s'explique par le rapprochement des points de liage dans la structure tissée.

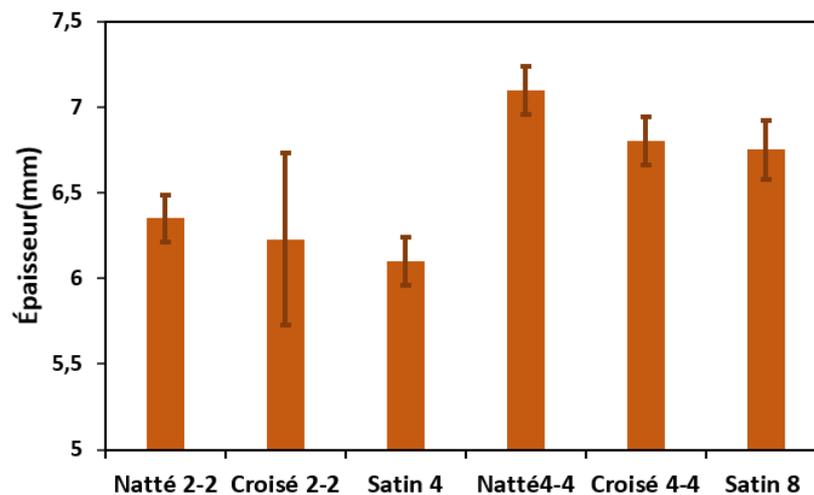


Figure III.8: Épaisseur des structures tissées 2D à base de fils de sisal

III.2.3.1.4. Masse surfacique

La masse surfacique des structures tissées 2D a été déterminée selon la norme NF EN 12127 [187]. La masse de cinq échantillons d'une dimension de $120 \times 120 \text{ mm}^2$ a été mesurée à l'aide d'une balance. La masse surfacique a été calculée selon l'équation (III.3):

$$M_s = \frac{m}{A} \quad (\text{III.3})$$

Avec :

M_s est la masse surfacique (g/m^2), m est la masse (g) et A est la surface de l'échantillon (m^2).

III. Étude des structures fibreuses de sisal à l'échelle tissu

La masse surfacique des structures tissées 2D est représentée en Figure III.9. Les résultats obtenus montrent que la masse surfacique des structures tissées 2D du groupe A est significativement plus faible que la masse surfacique des structures tissées 2D du groupe B. Cette différence est liée à la densité la plus élevée des fils de sisal au sein des structures tissées 2D du groupe B par rapport à celle des structures tissées 2D du groupe A. Pour les structures tissées 2D appartenant au groupe A, la structure tissée natté 2-2 possède la masse surfacique la plus élevée des structures tissées du groupe A, ce qui est attribué au type d'armure. Concernant les structures tissées 2D du groupe B, la structure tissée natté 4-4 possède la masse surfacique la plus élevée dépendant du type d'armure. La densité des fils et le type d'armure des structures tissées 2D influent sur la masse surfacique de ces structures et peuvent être considérés comme des paramètres significatifs pour la variation du taux massique de fibres de ces structures. Les structures tissées 2D (natté 2-2 et natté 4-4) représentent des armures dérivées directes de l'armure toile, ce qui peut justifier la valeur élevée de la masse surfacique car l'armure toile possède la valeur la plus élevée de la masse surfacique à iso-densités et iso-titrages des fils de chaîne et trame.

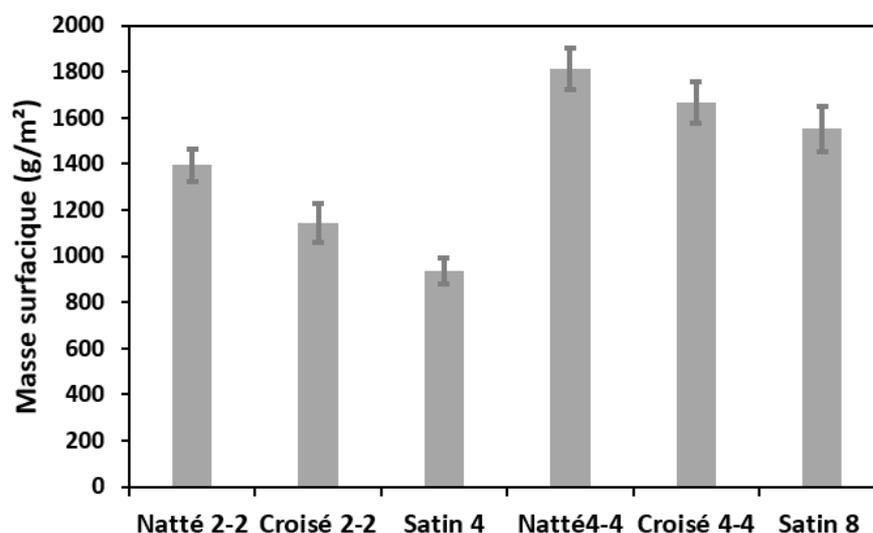


Figure III.9: Masse surfacique des structures tissées 2D à base de fils de sisal

III.2.3.2. Propriétés mécaniques des structures tissées 2D

Les propriétés mécaniques des structures tissées 2D permettent d'évaluer leur potentiel en performance en tant que renfort fibreux au sein de matériaux composites. Généralement, les sollicitations mécaniques appliquées sur les renforts des matériaux composites sont des sollicitations en traction, flexion et compression.

III. Étude des structures fibreuses de sisal à l'échelle tissu

III.2.3.2.1. Propriétés en traction des structures tissées 2D

III.2.3.2.1.1. Présentation de l'essai de traction

Les propriétés en traction uniaxiale des structures tissées 2D ont été analysées selon la norme EN ISO 13934 [188]. Les échantillons testés sont de dimensions 300 mm × 50 mm. Pour empêcher le glissement des échantillons au niveau des mors de la machine de traction, des talons à base de résine époxy (SR 8200 SICOMIN) ont été ajoutés. Cinq échantillons ont été testés dans chaque direction chaîne et trame. Les échantillons ont été testés dans les sens chaîne et trame à l'aide d'une machine de traction INSTRON 5980 250 KN (Figure III.10) à température ambiante. La vitesse de l'essai de traction est de 100 mm/min.



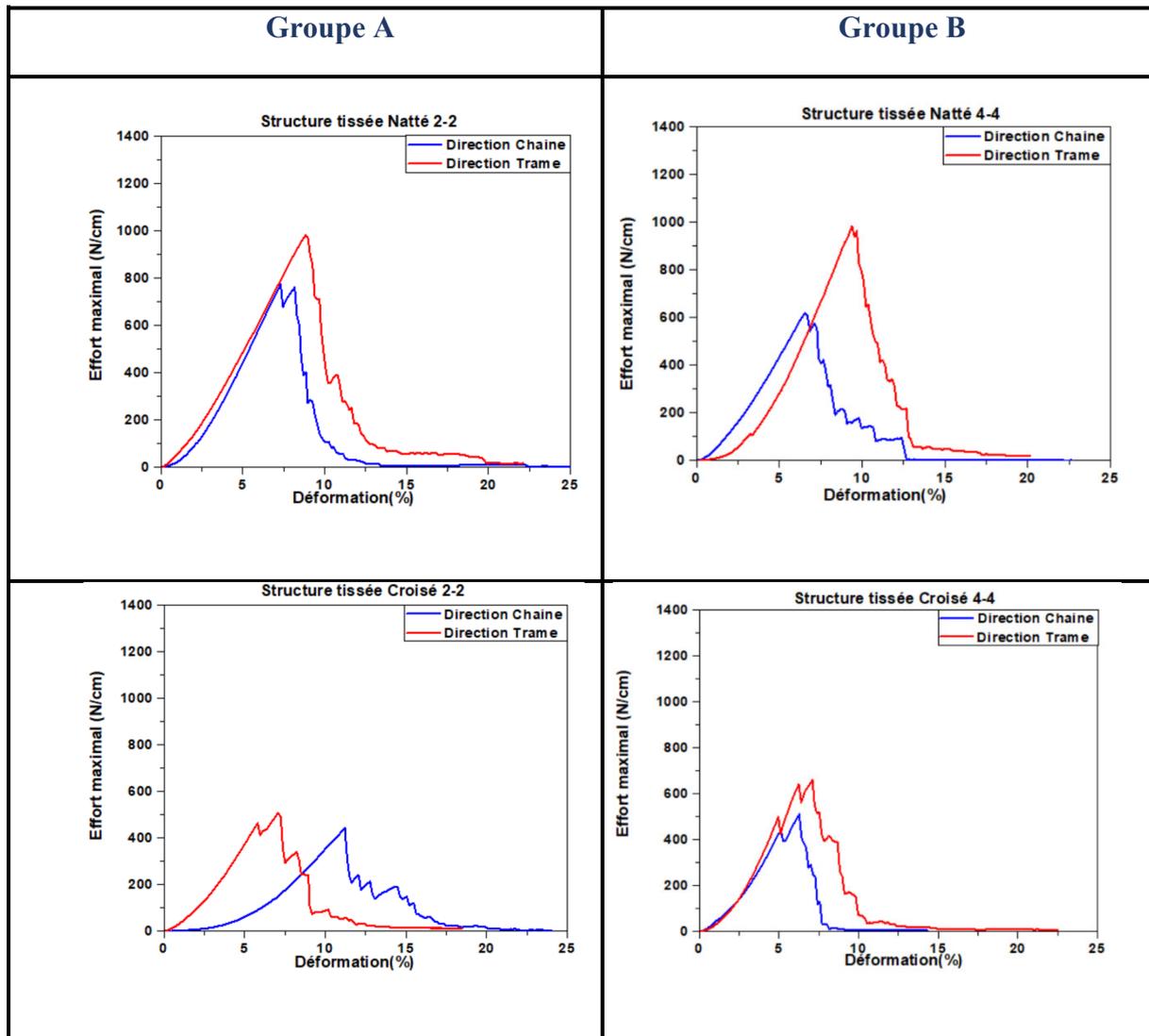
Figure III.10: Banc de traction INSTRON 5890 250 KN

III.2.3.2.1.2. Caractérisation en traction des structures tissées 2D

La caractérisation en traction uni axiale des structures tissées 2D a été effectuée dans les deux directions (chaîne et trame). La Figure III.11 illustre l'allure des courbes « Effort - Déformation » des structures tissées 2D réalisées à base de fils de sisal. La courbe « Effort - Déformation » des différentes structures tissées 2D peut être décomposée en trois phases. La valeur de l'effort a été calculée en N/cm afin de minimiser l'impact des différences de largeur des échantillons. La première phase correspond à la partie initiale non-linéaire de la courbe,

III. Étude des structures fibreuses de sisal à l'échelle tissu

cette phase est liée à la « désondulation » des fils au sein des échantillons dans la direction de sollicitation, ainsi que l'augmentation de l'ondulation des fils dans la direction inverse. La deuxième phase correspond à la phase linéaire traduisant l'allongement de la structure tissée jusqu'à la rupture. La troisième phase correspond à la décharge [189].



III. Étude des structures fibreuses de sisal à l'échelle tissu

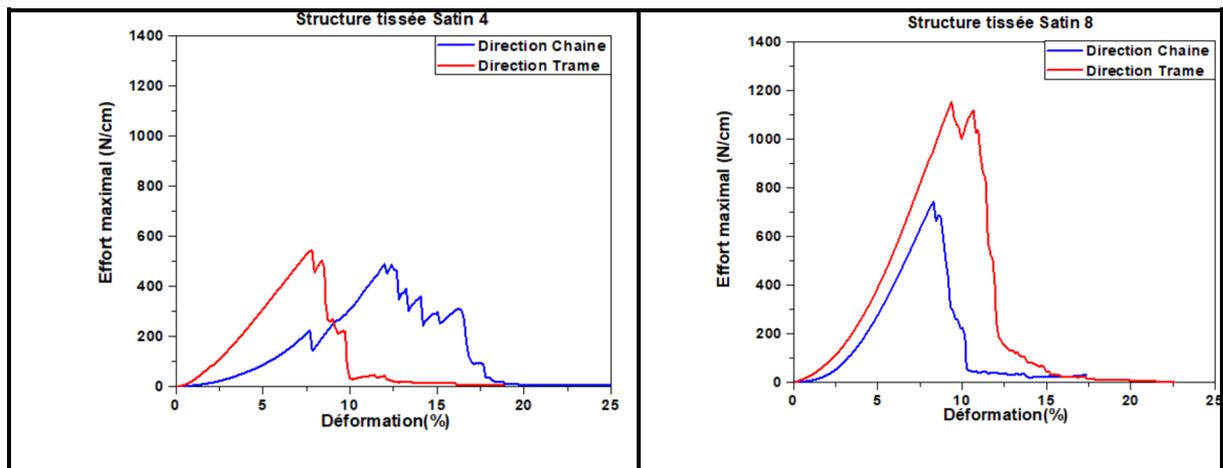


Figure III.11: Courbe « Effort -Déformation » des structures tissées 2D à base de fils de sisal

La Figure III.12 illustre l'effort maximal des structures tissées 2D à base de fils de sisal. L'effort maximal à rupture des structures tissées 2D à base de fils de sisal du groupe A dépend du type d'armure et de la densité des fils dans la direction chaîne et trame. Les structures tissées 2D (croisé 2-2 et satin 4) représentent un effort maximal à rupture similaire dans les deux directions, ce qui est représentatif d'une armure équilibrée dans les deux directions avec une densité des fils approximativement identique en chaîne et trame. Tandis que, l'effort maximal à rupture de la structure tissée 2D natté 2-2 est supérieure en direction chaîne par rapport à la direction trame. Pour les structures tissées 2D à base de fils de sisal du groupe B, l'effort maximal à rupture de la structure tissée 2D natté 4-4 et croisé 4-4 est supérieur en direction chaîne par rapport à la direction trame dont la densité des fils de chaîne est similaire à la densité des fils de trame. Tandis que l'effort maximal de la structure tissée satin 8 dans la direction chaîne est inférieur par rapport à la direction trame, ce qui est lié à l'importante densité des fils dans la direction trame par rapport à la direction chaîne. La différence observée de l'effort maximal des structures tissées 2D du groupe A et du groupe B est reliée clairement à la densité des fils dans les deux directions (Figure III.12).

III. Étude des structures fibreuses de sisal à l'échelle tissu

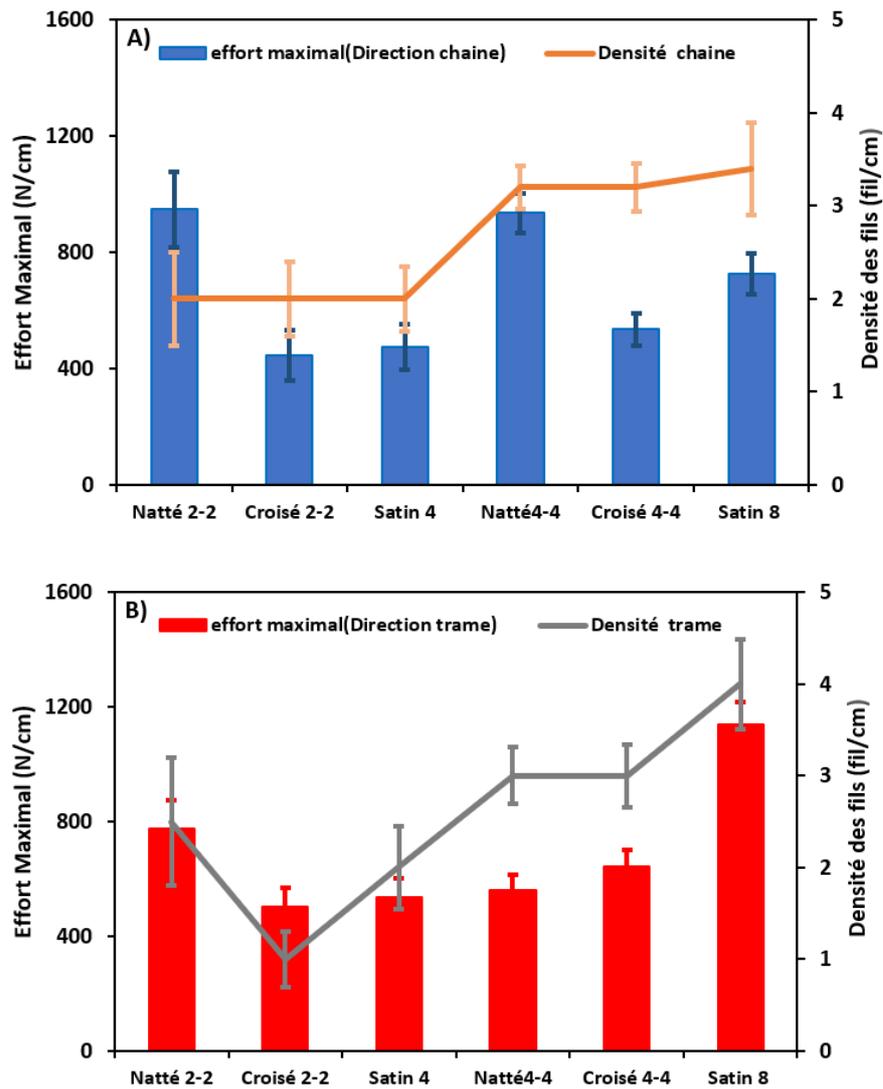


Figure III.12: A. Effort maximal des structures tissées 2D à base de fils de sisal dans la direction chaîne et B. Effort maximal des structures tissées 2D à base de fils de sisal dans la direction trame

La déformation à la rupture des structures tissées 2D à base de fils de sisal est présentée en Figure III.13. La déformation à la rupture des structures tissées 2D varie généralement en fonction de l'embuvage et du retrait des fils au sein de ces structures. Pour les structures tissées 2D du groupe A, la déformation à la rupture de la structure tissée natté 2-2 est proche dans les deux directions (chaîne et trame), ce qui est attribué aux valeurs identiques d'embuvage et de retrait des fils. A contrario, la déformation à rupture des structures tissées 2D d'armures croisé 2-2 et satin 4 en direction chaîne est supérieure à celle en direction trame, ce qui est lié à la valeur élevée de l'embuvage des fils par rapport au retrait des fils. Pour les structures tissées 2D du groupe B, la déformation à rupture de la structure tissée 2D d'armure natté 4-4 en

III. Étude des structures fibreuses de sisal à l'échelle tissu

direction chaîne est supérieure à celle en direction trame. Ce qui n'est pas le cas pour les structures tissées 2D d'amures croisé 4-4 et satin 8, pour lesquelles la déformation à rupture de ces structures en direction chaîne est similaire à celle dans la direction trame.

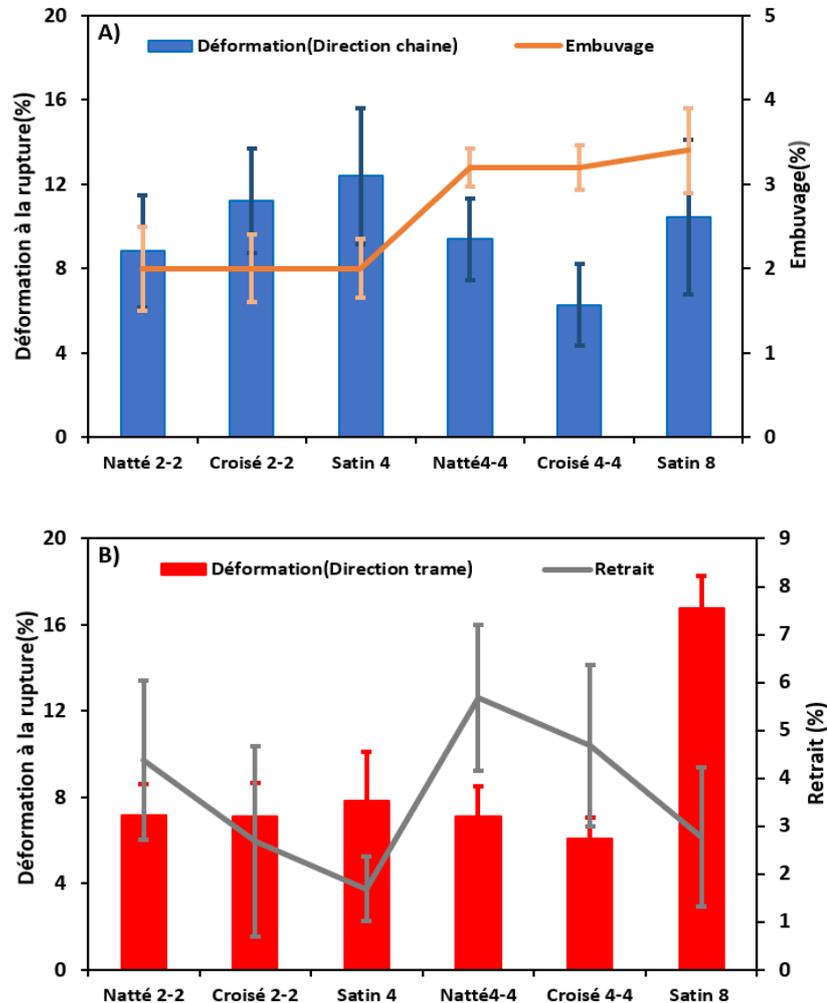


Figure III.13: A. Déformation à rupture et valeurs d'embuvage des structures tissées 2D à base de fils de sisal dans la direction chaîne et B. Déformation à rupture et valeurs du retrait des structures tissées 2D à base de fils de sisal dans la direction trame

III.2.3.2.2. Propriétés en flexion des structures tissées 2D

III.2.3.2.2.1. Présentation de l'essai de flexion

Le comportement en flexion des structures tissées 2D joue un rôle important dans la mise en forme des renforts textiles, notamment dans l'apparition des défauts lors de l'étape de préformage [14-16]. Le test cantilever a été proposé par Peirce pour caractériser le comportement en flexion des structures tissées selon la norme ISO 4604 [190]. L'essai de

III. Étude des structures fibreuses de sisal à l'échelle tissu

flexion a été effectuée sur le principe du porte-à-faux (Figure III.14), qui consiste à étudier la déformation en flexion d'un échantillon qui fléchit sous son propre poids. L'échantillon possède la même taille que les échantillons de l'essai de traction. La longueur d'avancement de l'échantillon, est mesurée lorsque l'extrémité entre en contact avec un plan incliné à 41.5°. Le coefficient de rigidité en flexion est calculée selon l'équation (III.4) [191]. Cinq échantillons de chaque type de structures tissées 2D ont été testés dans les sens chaîne et trame.

$$B = W_s \times \frac{L^3}{8} \times 9,81 \quad (\text{III.4})$$

Avec :

B est le coefficient de rigidité en flexion de l'échantillon (N.cm), W_s est la masse surfacique (g/m^2), $9,81 \text{ m/s}^2$ est l'accélération gravitationnelle et L est la longueur d'avancement (cm).

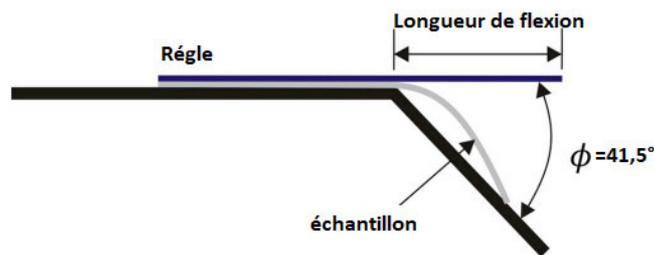


Figure III.14: Schéma du test cantilever [192]

III.2.3.2.2.2. Caractérisation en flexion des structures tissées 2D

Les valeurs du coefficient de rigidité en flexion des structures tissées 2D sont rapportées en Figure III.15. Les valeurs du coefficient de rigidité en flexion des structures tissées 2D du groupe A sont inférieures à celles des structures tissées 2D du groupe B. Cette différence est attribuée à la masse surfacique des structures du groupe B qui est supérieure à celle du groupe A (Figure III.9). Pour les structures tissées 2D du groupe A, les valeurs du coefficient de rigidité en flexion des structures tissées 2D (natté 2-2 et satin 4) sont similaires dans les deux directions chaîne et trame, cela est dû à la légère différence entre la densité des fils dans les deux directions chaîne et trame. Contrairement à la structure tissée 2D (croisé 2-2) pour laquelle la densité des fils dans la direction chaîne est plus élevée que celle dans la direction trame et dont la valeur du coefficient de rigidité en flexion dans la direction chaîne est supérieure à celle de la direction trame. Pour les structures tissées 2D du groupe B, la structure tissée natté 4-4 montre un comportement en flexion équilibré dans les deux directions, ce qui est attribué au type d'armure

III. Étude des structures fibreuses de sisal à l'échelle tissu

et la densité des fils dans les deux directions. Contrairement à la structure croisé 4-4 qui a une rigidité en flexion légèrement supérieure dans la direction chaîne par rapport à la direction trame. La structure tissée satin 8 présente une rigidité en flexion légèrement supérieure dans la direction trame par rapport à la direction chaîne. Ces résultats ont montré également, conformément à la littérature [191]–[194] que la densité des fils influe sur la rigidité en flexion des structures tissées 2D à base de fils de sisal.

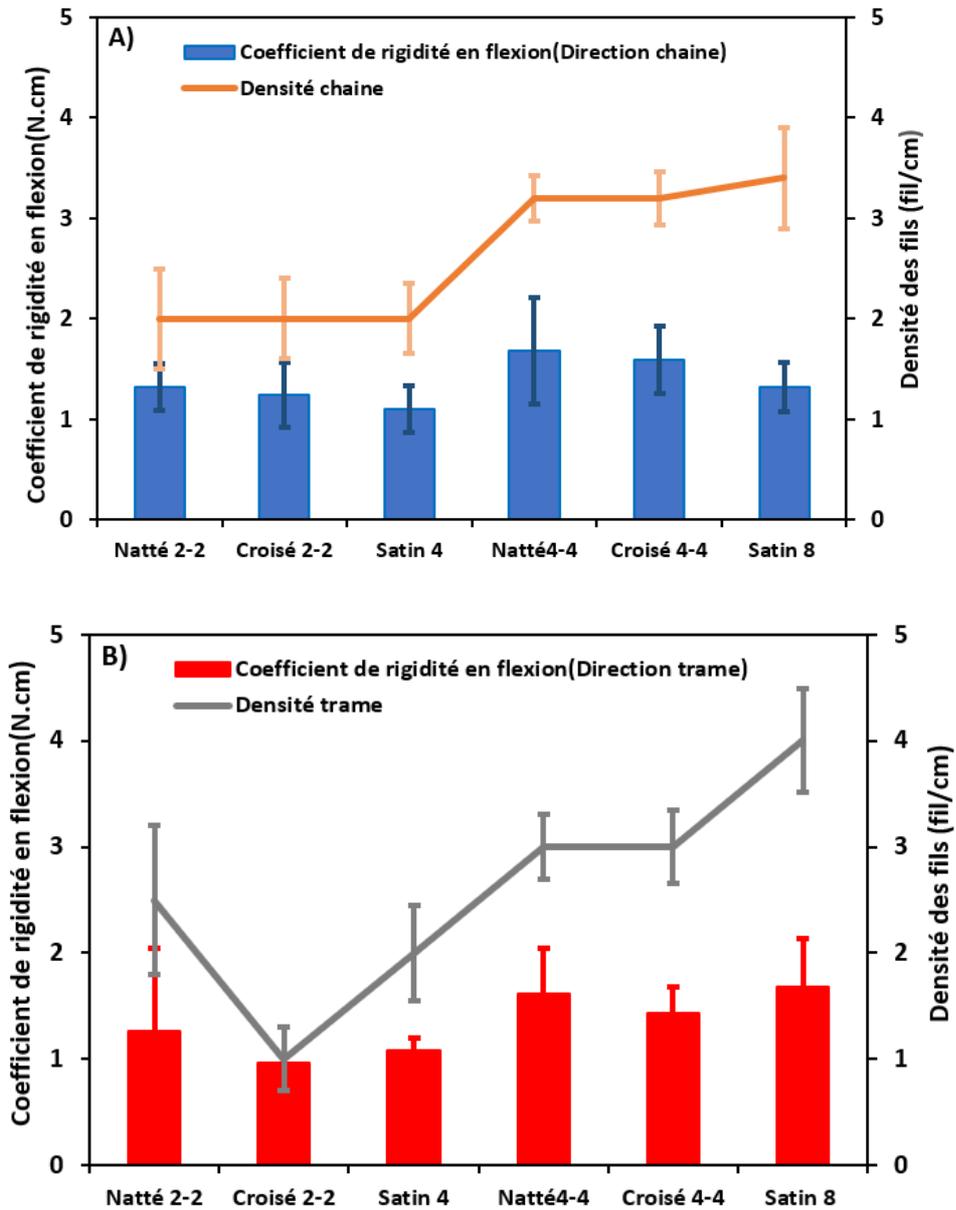


Figure III.15: A. Coefficient de rigidité en flexion et densité des fils des structures tissées 2D à base de fils de sisal dans la direction chaîne et B. Coefficient de rigidité en flexion et densité des fils des structures tissées 2D à base de fils de sisal dans la direction trame

III. Étude des structures fibreuses de sisal à l'échelle tissu

III.2.3.2.3. Propriétés en compaction des structures tissées 2D

Afin de compléter l'analyse du comportement mécanique des structures tissées 2D. Le comportement en compaction des structures tissées 2D est une caractéristique importante lors du processus de fabrication des matériaux composites.

III.2.3.2.3.1. Présentation de l'essai de compaction

L'essai de compaction a été effectué sur le banc universel INSTRON 5890 250 KN. Des plis de structures tissées 2D de dimension $80 \times 80 \text{ mm}^2$ ont été coupés avec un emporte-pièce et sont positionnés entre deux plaques. L'analyse du comportement en compaction permet de déterminer la fraction volumique des fibres en fonction de la pression appliquée. La pression P est calculée en fonction de la force mesurée selon l'équation (III.5). Le taux volumique de fibre T est calculé en fonction de la masse surfacique, de la densité de la fibre de sisal, l'épaisseur et la surface de contact entre l'échantillon et le plateau selon l'équation (III.6).

$$P = \frac{F}{A} \quad (\text{III.5})$$

$$T = \frac{M_s}{\rho \times A \times e^2} \quad (\text{III.6})$$

Avec :

P la pression (bar), F la force mesurée (N), A la surface de contact entre l'échantillon et le plateau (mm^2), T le taux volumique de fibre (%), M_s la masse surfacique (g/m^2), e l'épaisseur de l'échantillon (cm) et ρ la densité de la fibre de sisal (g/cm^3).

III.2.3.2.3.2. Caractérisation en compaction des structures tissées 2D

Le comportement en compaction des structures tissées 2D à base de fils de sisal est présenté en Figure III.16. L'allure des courbes de compaction des structures tissées 2D est divisée en deux phases. La première phase correspond à une faible raideur de la partie initiale de la courbe, qui est liée au mouvement de comblement des espaces libres entre les fils. La deuxième phase correspond à la partie de très fort raidissement, qui est attribué à la compaction des fils. Les structures tissées 2D du groupe A possèdent une fraction volumique maximale de fibres d'environ 35%, alors que les structures tissées 2D du groupe B possèdent une fraction

III. Étude des structures fibreuses de sisal à l'échelle tissu

volumique maximale de fibres d'environ 45%.

Les armures Natté 2-2, Natté 4-4 et croisé 2-2 possèdent une allure de compaction similaire. Les armures Satin 4 et Satin 8 se situent aux deux extrémités des allures de courbe de la Figure III.16, ce qui montre que les points de liage isolés de l'armure satin couplé à leur nombre par raccord d'armure tend à favoriser le compactage des fils au sein de la structure tissée.

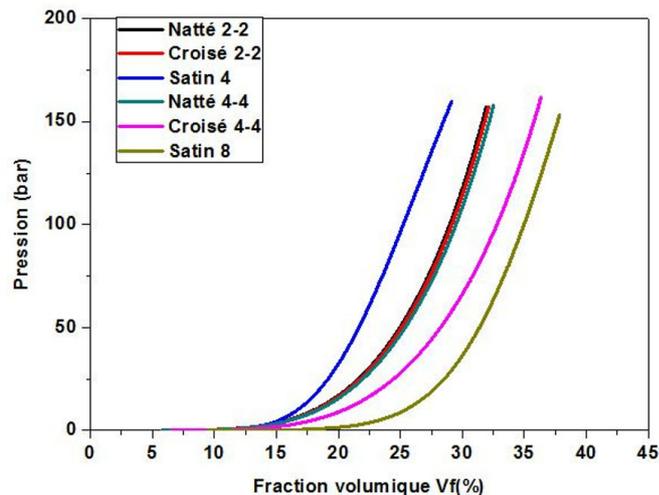


Figure III.16: Comportement en compaction des structures tissées 2D à base de fils de sisal

III.2.3.2.4. Analyse des propriétés mécaniques des tissus 2D

Pour conclure sur l'analyse des propriétés mécaniques des structures tissées 2D à base de fils de sisal, les propriétés en traction et en flexion des structures tissées 2D dépendent de la densité des fils et du type d'armure. Les propriétés en compaction des structures tissées 2D permettent de déterminer le taux volumique de fibres pour le renforcement des matériaux composites.

III.3. Étude des structures tissées 3D interlocks chaines

III.3.1. Conception des structures tissées 3D interlocks chaines

Les structures tissées 3D interlocks chaines peuvent être représentées par un empilement de couches des structures tissées 2D avec un liage à travers l'épaisseur. La définition générale des structures tissées 3D interlocks chaines a été décrite dans le chapitre de l'état de l'art (section I.3.3) et permet de représenter le type d'architecture tissée et les positionnements précis de

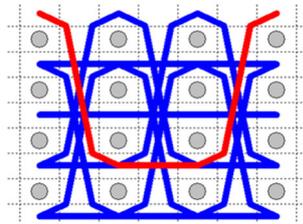
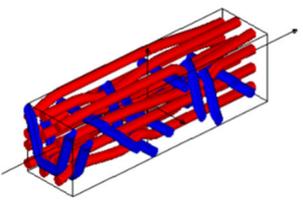
III. Étude des structures fibreuses de sisal à l'échelle tissu

chaque type de fils. Sur la base des quatre principales familles des structures tissées 3D interlocks chaines, nous avons sélectionné les principales familles de ces structures pour la conception de six architectures possédant quatre couches de fils de trame. Les structures tissées 3D interlocks chaines (O-L et O-T) ont été déclinées en plusieurs configurations pour montrer l'influence des armures de liage sur les propriétés résiduelles de ces structures. La conception de toutes ces structures tissées 3D interlocks chaines est basée sur plusieurs paramètres, tels que :

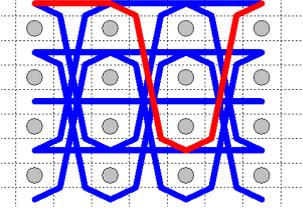
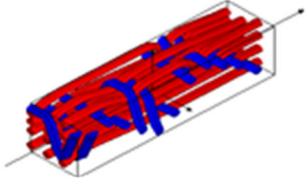
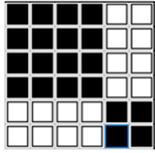
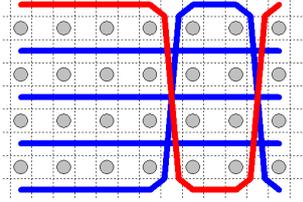
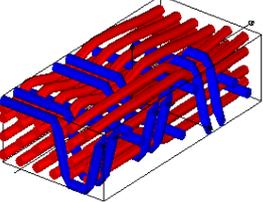
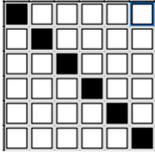
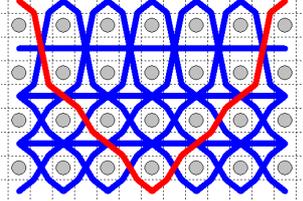
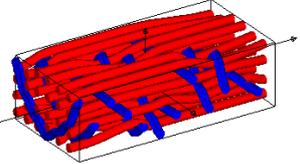
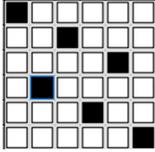
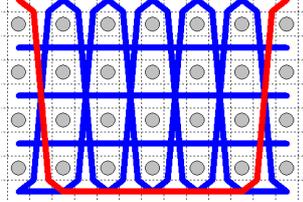
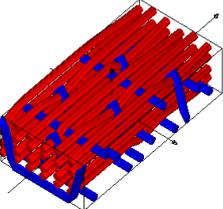
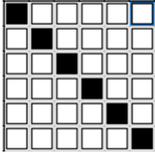
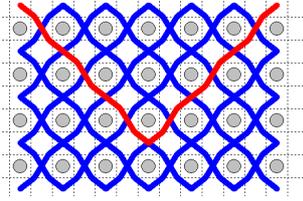
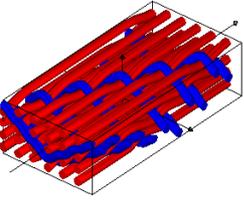
- L'angle de liage (Orthogonal (O) ou Angle (A)),
- Le type de liage (couche à couche (L) ou à travers l'épaisseur (T)),
- La proportion de fils de chaîne de liage par rapport aux fils de chaîne de renfort,
- La position des fils de chaîne de liage et de renfort,
- L'armure des fils de chaîne de liage.

La modélisation géométrique 2D des structures tissées 3D interlocks chaines permet de déterminer le positionnement des fils (de trame, de chaîne de liage et de chaîne de renfort) et de décrire l'armure des fils de chaîne de liage à travers l'épaisseur. Alors que, la représentation 3D permet de visualiser l'architecture en identifiant les différents fils de chaîne par la couleur bleue et les fils de trame par la couleur rouge. Le Tableau III-3 représente les structures fibreuses tissées 3D interlock chaîne.

Tableau III-3: Représentation 3D et coupe transversale des structures tissées 3D interlocks chaines à base de fils de sisal

Définition complète des tissus 3D interlocks chaines	Armure des fils de liage	Coupe Transversale	Représentation 3D
<p>TISSU 3D INTERLOCK CHAINE O-L 4 2-3 LIAGE {SERGE 3 EFFET TRAME CORDON A GAUCHE}{1 5 9 - 2 6 10 - # - # - #} - RENFORT {# - 3 8 - 4 11 - 7 12 - #}</p>			

III. Étude des structures fibreuses de sisal à l'échelle tissu

<p>TISSU 3D INTERLOCK CHAINE O-L 4 1-3 LIAGE {SERGE 3 EFFET CHAINE CORDON A GAUCHE}{1 5 9 - 2 6 10 - # - # - #} - RENFORT {# - 3 8 - 4 11 - 7 12 - #}</p>			
<p>TISSU 3D INTERLOCK CHAINE O-T 4 2-4 LIAGE {NATTE 4-2}{1 2 5 6 9 10 - # - # - # - #} - RNFORT {# - 3 8 - 4 11 - 7 12 - #}</p>			
<p>TISSU 3D INTERLOCK CHAINE A-T 4 5-4 LIAGE {SERGE 6 FAÇONNE} {1 2 5 6 9 10 - # - # - # - #} - RENFORT {# - 3 8 - 4 11 - 7 12 - #}</p>			
<p>TISSU 3D INTERLOCK CHAINE O-T 4 5-4 LIAGE {SERGE 6 FAÇONNE 1P5L-3L1P2L} {1 2 5 6 9 10 - # - # - # - #} - RENFORT {# - 3 8 - 4 11 - 7 12 - #}</p>			
<p>TISSU 3D INTERLOCK A- L 4 5-3 LIAGE {SERGE 6 EFFET TRAME CORDON A GAUCHE } {1 3 5 7 9 11 - 2 4 6 8 10 12 - # - # - # - # - #}</p>			

III.3.2. Procédé de tissage des structures tissées 3D interlocks chaines

La fabrication des structures tissées 3D a été réalisée sur le même procédé de tissage des structures tissées bidirectionnelles 2D décrit dans la section III.2.2. Avant de procéder à la préparation des fils de chaîne, le nombre d'ensouples et le nombre de fils sur chaque ensouple a été plus important que ceux du procédé de tissage des structures tissées 2D en raison des différents types de fils de chaîne (fils de liage, fils de renfort) et du nombre de couches constituant les structures tissées 3D interlocks chaines. Douze ensouples avec seize fils sur chaque ensouple ont été préparés pour la production des structures tissées 3D interlocks chaines.

III. Étude des structures fibreuses de sisal à l'échelle tissu

La première étape (encantrage) a consisté à placer seize bobines des fils de sisal sur les cantres. Ce nombre est supérieur au nombre de bobines pour les structures tissées 2D, par la présence des fils de chaîne de renfort et de liage au sein de ces structures 3D. La deuxième étape consiste à préparer douze ensouples comportant chacune seize fils en se basant sur le principe de l'ourdissage direct. Après le positionnement des ensouples sur le cantre de la machine à tisser d'échantillonnage ARM, les fils ont été retirés des ensouples pour leur insertion dans chaque œillet en suivant le plan de rentrage déterminé dans la section III.2.2.2. Le rentrage a été effectué sur 24 cadres, chaque cadre comporte 8 lisses. Puis, le piquage a été effectué avec le même peigne de 500 mm selon une densité de 4 fils par cm. Le tissage des tissus 3D interlocks à base des fils de sisal est basé généralement sur trois opérations, la première opération consiste à sélectionner les fils de chaîne pour former la foule, la deuxième opération consiste à insérer les fils de trame par le biais d'une navette et la troisième opération permet de tasser le fil de trame inséré à la ligne de formation du tissu.



A. Ourdissage direct



B. Rentrage et piquage



C. Tissage

Figure III.17: Procédé de tissage des structures tissées 3D interlocks chaines

III.3.3. Caractérisation des structures tissées 3D interlocks chaines

Après la fabrication des structures tissées 3D interlocks chaines (Figure III.18), l'analyse des différentes propriétés a été effectuée selon les normes en conditionnant les structures sous

III. Étude des structures fibreuses de sisal à l'échelle tissu

atmosphère contrôlée ($20 \pm 2,0^\circ\text{C}$, $65 \pm 4,0\%$) selon la norme ISO 139 [183].

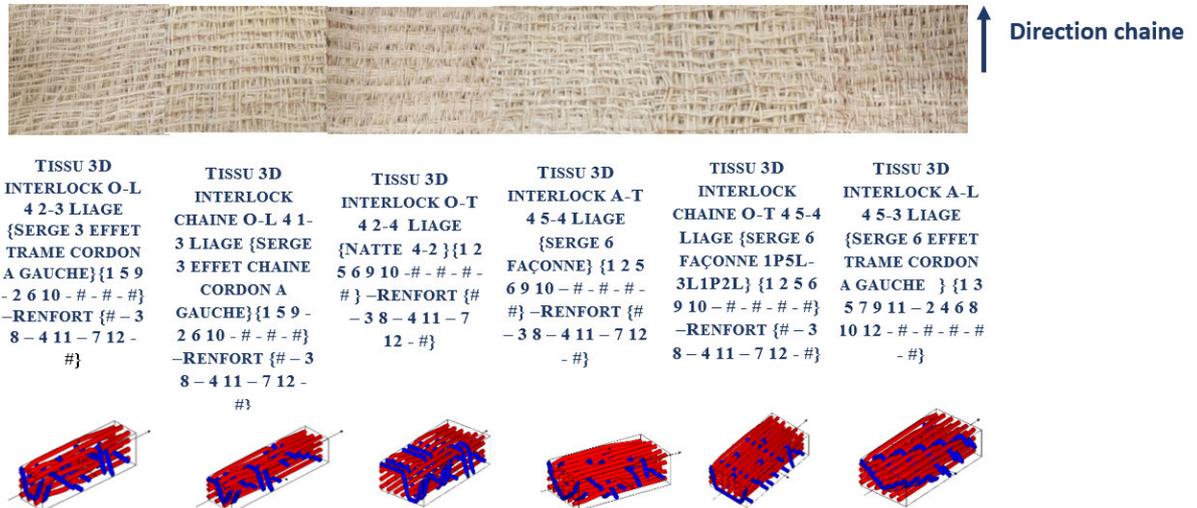


Figure III.18: Vue en face avant des structures tissées 3D interlocks chaines produites

III.3.3.1. Propriétés structurelles des structures tissées 3D interlocks chaines

Les propriétés structurelles des structures tissées 3D interlocks chaines ont été analysées selon les normes en déterminant la densité des fils, l'épaisseur, la masse surfacique, l'embuvage et le retrait des différents types de fils.

III.3.3.1.1. Densité chaîne et trame

La densité des fils de chaîne et de trame a été déterminée en suivant le même protocole expérimental utilisé pour les structures tissées 2D (section III.2.3.1.1). La densité des fils de chaîne par couche de toutes les structures tissées 3D interlocks chaines est similaire puisqu'ils ont été fabriqués avec la même densité de fil résultant d'un embrochage de 2 fils/dent et d'un peigne de 2 dents/cm. La valeur de la densité des fils de chaîne mesurée sur la surface supérieure des structures tissées 3D interlocks chaines est égale à 3 fils/cm (Figure III.19). Pour la densité des fils de trame, une légère différence a été observée entre les structures O-L 4 2-3 Liage Sergé 3, O-L 4 1-3 Liage Sergé 3 (2 fils/cm) et les autres structures tissées 3D interlocks chaines (3 fils/cm). Cette différence significative peut être justifiée par le rôle de l'armure des fils de chaîne de liage qui augmente probablement la tension du fil de chaîne de liage et réduit ensuite l'espace disponible pour les fils de trame dans le sens de l'épaisseur [180].

III. Étude des structures fibreuses de sisal à l'échelle tissu

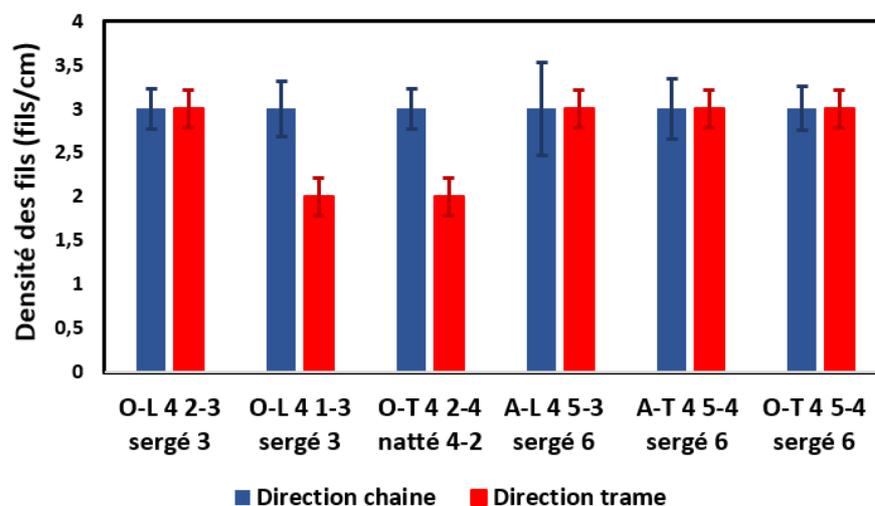


Figure III.19: Densité des fils des structures tissées 3D interlocks chaines à base de fils de sisal

III.3.3.1.2. Embuvage et retrait

L'embuvage et le retrait des différents types de fils au sein des structures tissées 3D interlocks chaines (Figure III.20 et Figure III.21) ont été mesurés en suivant le protocole expérimental expliqué dans la section III.2.3.1.2. L'embuvage des fils de chaîne de liage est généralement supérieur par rapport à l'embuvage des fils de chaîne de renfort pour les différentes structures tissées 3D interlocks chaîne à l'exception de la structure A-L 4 5-3 Liage Sergé 6 qui ne possède pas de fils de chaîne de renfort. Cela peut se justifier par le positionnement des fils de chaîne de renfort dans chaque couche sans entrecroisement avec les fils de trame, contrairement aux fils de chaîne de liage qui sont insérés à travers l'épaisseur en créant des points de croisement avec les fils de trame. La valeur moyenne de l'embuvage des fils de chaîne de renfort est approximativement similaire pour toutes les structures tissées 3D interlocks chaines, ce qui tend à refléter l'influence assez neutre des fils de chaîne de renfort en variant le type d'architecture des structures tissées 3D interlocks chaîne. Cela est due à la faible tension appliquée au niveau des ensouples des fils de chaîne de renfort pendant le processus de tissage.

L'embuvage (Figure III.20) des fils de chaîne de liage des structures tissées O-L 4 2-3 Liage Sergé 3 et O-L 4 1-3 Liage Sergé 3 présente une différence non significative mais dont la valeur moyenne indique que l'armure de liage de type sergé 3 effet chaîne sollicite plus les fils de chaîne de liage que l'armure de type sergé 3 effet trame. La valeur d'embuvage des fils de liage la plus élevée est attribuée aux structures A-T 4 5-4 Liage sergé 6 façonné et O-T 4 5-4 Liage

III. Étude des structures fibreuses de sisal à l'échelle tissu

sergé 6 façonné par rapport aux autres structures. Cette valeur est justifiée par l'armure des fils de chaîne de liage qui engendre une consommation en longueur des fils de chaîne plus importante.

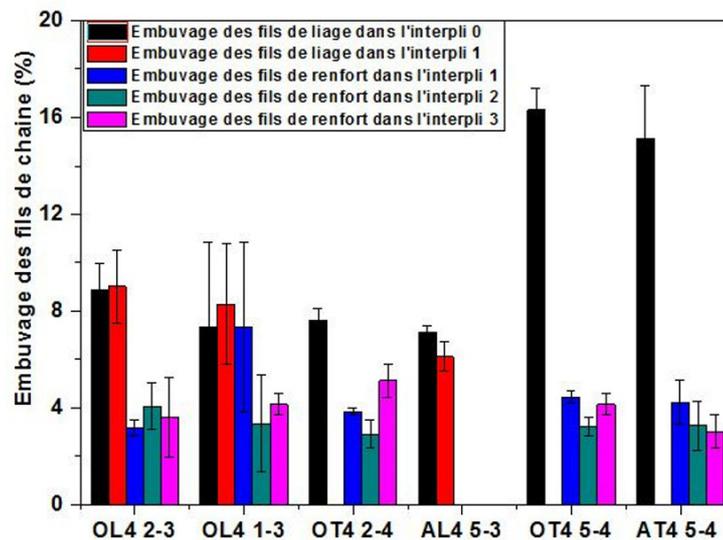


Figure III.20: Embuvage des fils de chaîne au sein des structures tissées 3D interlocks chaînes à base de fils de sisal

Le retrait des fils de trame a été calculé à partir des différentes couches (l'ordre des couches est présenté de la couche supérieure jusqu'à la couche inférieure). Le retrait (Figure III.21) des fils de trame des structures tissées 3D interlocks chaînes suit la même tendance que l'embuvage des fils de liage de ces structures. La valeur maximale du retrait des fils de trame est obtenue par les structures tissées A-T 4 5-4 Liage sergé 6 façonné et O-T 4 5-4 Liage sergé 6 façonné. L'ondulation des fils de trame au sein de ces structures est attribuée aux points de croisement entre les fils de trame et les fils de chaîne de liage [180].

III. Étude des structures fibreuses de sisal à l'échelle tissu

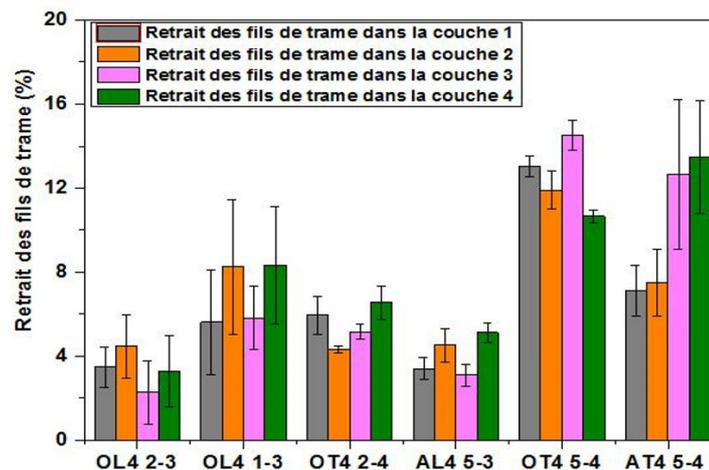


Figure III.21: Retrait des fils de trame au sein des structures tissées 3D interlocks chaîne à base de fils de sisal

III.3.3.1.3. Épaisseur et masse surfacique

L'épaisseur et la masse surfacique des structures tissées 3D interlocks chaîne à base de fils de sisal (Figure III.22) ont été mesurés selon les normes NF EN ISO 5084 [186] et NF EN 12127 [187]. Une différence significative a été observée entre les valeurs de l'épaisseur et de la masse surfacique des structures tissées 3D interlocks chaînes comme l'illustre la Figure III.22. La structure O-T 4 2-4 Liage Natté 4-2 révèle une différence significative dans la valeur de la masse surfacique par rapport aux autres structures. Cette différence est justifiée par l'armure des fils de chaîne de liage qui tend à augmenter la compacité des fils insérés à l'intérieur de la structure tissée 3D, ce qui permet également de réduire les ondulations.

L'épaisseur des structures tissées 3D interlocks chaînes est présentée dans la Figure III.22. L'épaisseur de la structure A-L 4 5-3 Liage Sergé 6 effet trame est la valeur la plus élevée de l'épaisseur par rapport aux autres structures. L'angle d'insertion des fils de chaîne de liage au sein de la structure A-L 4 5-3 Liage Sergé 6 effet trame a contribué à l'augmentation de l'épaisseur de cette structure. La variabilité de la masse surfacique moyenne des différentes structures tissées 3D interlock chaîne est due à la valeur initiale irrégulière du titrage des fils de sisal.

III. Étude des structures fibreuses de sisal à l'échelle tissu

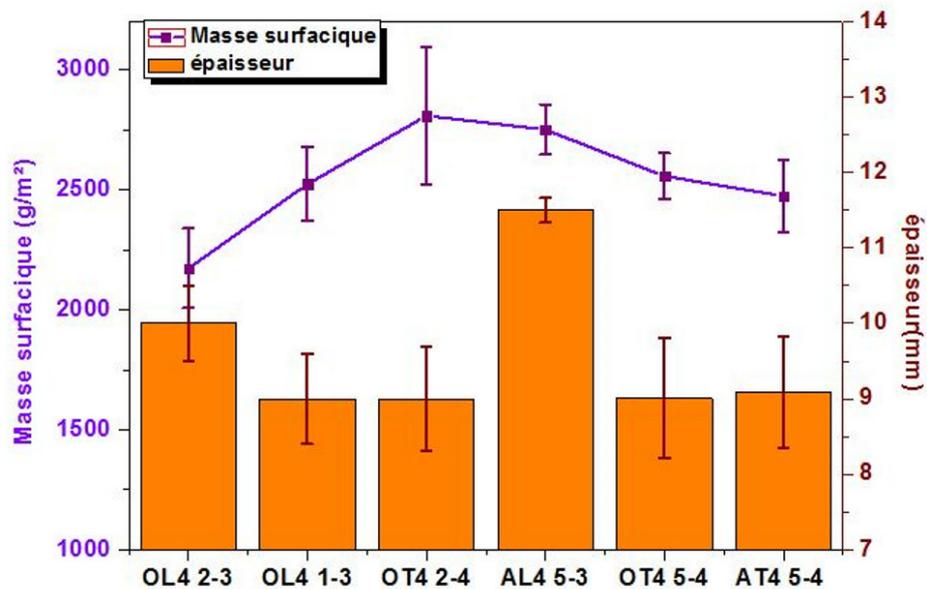


Figure III.22: Masse surfacique et épaisseur des structures tissées 3D interlocks chaînes à base de fils de sisal

III.3.3.1.4. Analyse des propriétés structurelles des tissus 3D interlocks chaînes

Pour conclure sur l'analyse des propriétés structurelles des tissus 3D interlock chaîne à base de fils de sisal, la densité des fils de chaîne et de trame sont approximativement similaires pour les différentes structures tissées 3D interlocks chaîne. L'embovage et le retrait des fils au sein des structures tissées 3D interlocks chaînes dépendent du procédé de tissage et du type d'insertion des fils de chaîne de liage au sein de ces structures. L'épaisseur structurelle des structures tissées 3D interlocks chaînes dépend du type d'armure des fils de chaîne de liage. Alors que, la masse surfacique de ces structures est influencée par le titrage des fils de sisal au sein de ces structures à iso-densité de fils de chaîne et trame.

III.3.3.2. Propriétés mécaniques des structures tissées 3D interlocks chaînes

Les propriétés mécaniques des structures tissées 3D interlocks chaînes sont identifiées sous des sollicitations en traction, en flexion et en compression.

III.3.3.2.1. Propriétés en traction des structures tissées 3D interlocks chaînes

III.3.3.2.1.1. Présentation de l'essai de traction

Les propriétés en traction des structures tissées 3D interlocks chaîne ont été analysées selon la norme EN ISO 13934 [188] en suivant le même protocole expérimental décrit précédemment

III. Étude des structures fibreuses de sisal à l'échelle tissu

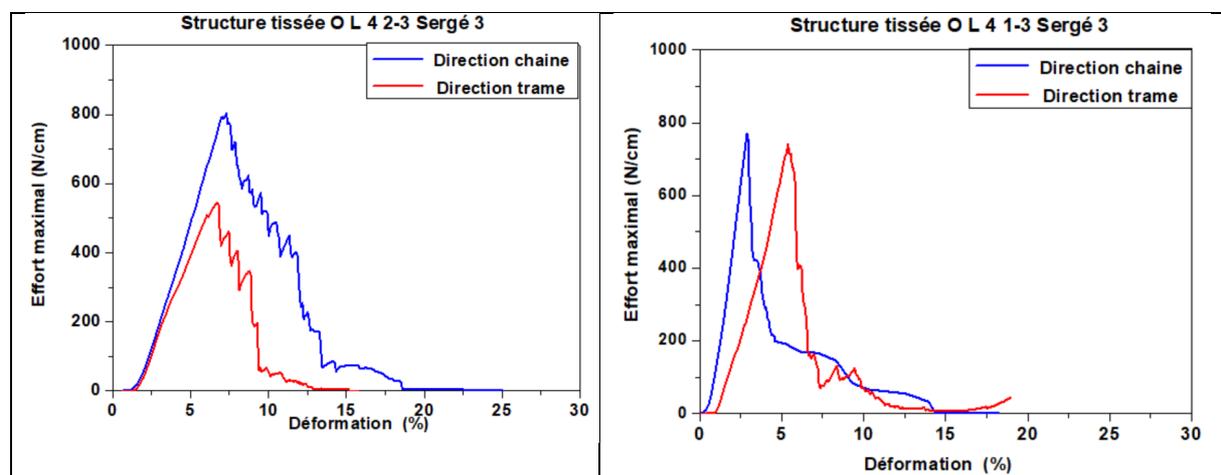
dans la section III.2.3.2.1.1. Pour empêcher le glissement des échantillons au niveau des mors de la machine de traction, des talons à base de résine époxy (SR 8200 SICOMIN) ont été ajoutés. Cinq échantillons ont été testés dans chaque direction (chaîne et trame) sur le banc de traction INSTRON 5980 250 KN.

III.3.3.2.1.2. Caractérisation en traction des structures tissées 3D interlocks chaines

La Figure III.23 représente l'allure des courbes «Effort -Déformation» en traction des structures tissées 3D interlocks chaines. Ces courbes se caractérisent par un seul pic correspondant à la rupture de l'ensemble des fils de chaîne et des fils de trame car la rupture des fils de chaîne de liage compense la rupture des fils de chaîne de renfort.

En comparant les valeurs en traction des architectures tissées O-L 4 1-3 sergé 3 effet trame et O-L 4 2-3 sergé 3 effet chaîne, il apparaît que l'effet chaîne ou trame de l'armure de liage sergé 3 n'influe pas sur les allures des courbes en traction pour cette architecture. La différence d'allure de courbe entre la direction chaîne et la direction trame peut s'expliquer par la différence légèrement supérieure de la valeur moyenne d'embuvage des fils de chaîne comparativement à la valeur moyenne du retrait des fils de trame.

La structure tissée O-T 4 2-4 Liage Natté 4-2 présente un comportement plus rigide en traction dans le sens chaîne que la structure O-T 4 5-4 Liage Sergé 6 qui a tendance à se déformer sur une plus grande plage de déformation en raison de sa valeur significativement plus élevée de l'embuvage des fils de chaîne de liage.



III. Étude des structures fibreuses de sisal à l'échelle tissu

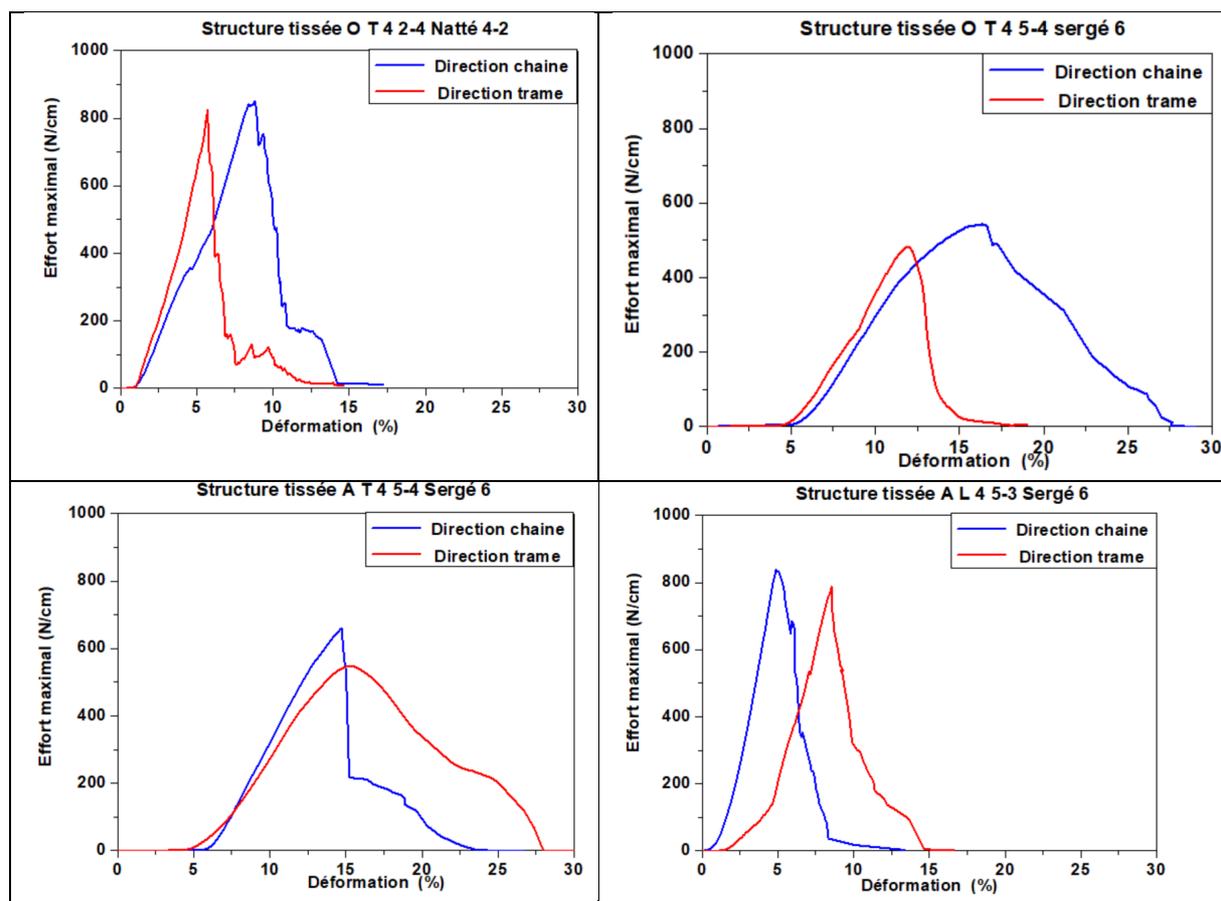


Figure III.23: Courbe « Effort maximal – déformation » des structures tissées 3D interlocks chaînes à base de fils de sisal

La Figure III.24 illustre les valeurs de l'effort maximal des structures tissées 3D interlocks chaînes à base de fils de sisal. L'effort maximal à rupture dans la direction chaîne montre que le procédé de tissage et le type d'architecture des structures tissées 3D interlocks chaînes exercent une influence significative tout en gardant les mêmes densités de fils de chaîne pour toutes les structures. La structure O-T 4 2-4 Liage Natté 4-2 présente les valeurs les plus élevées de l'effort maximal à rupture dans les deux directions (chaîne et trame). L'effort maximal à rupture des structures O-L 4 2-3 Liage Sergé 3 et O-L 4 1-3 Liage Sergé 3 est similaire dans la direction chaîne, contrairement à la direction trame où la valeur de la structure O-L 4 2-3 Liage Sergé 3 est supérieure à celle de la structure O-L 4 1-3 Liage Sergé 3. Cette différence significative s'explique en raison de la différence de la densité des fils de trame dans les deux structures et à la différence des valeurs de retrait des fils de trame. La valeur inférieure de l'effort maximal à rupture est atteinte pour les structures O-T 4 5-4 Liage sergé 6 façonné et A-L 4 5-3 Liage Sergé 6 effet trame, ce qui peut être justifié par des forces de frottement plus

III. Étude des structures fibreuses de sisal à l'échelle tissu

importantes entre les fils de chaîne de liage et les fils de trame par le liage à travers l'épaisseur pour la structure O-T 4 5-4 Liage sergé 6 façonné et l'absence des fils de chaîne de renfort au sein de la structure A-L 4 5-3 Liage Sergé 6 effet trame.

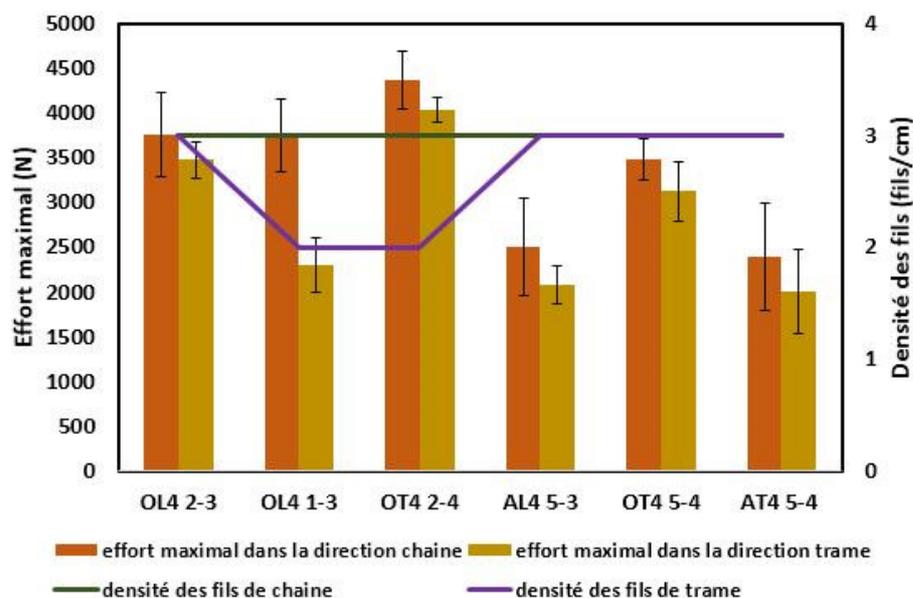


Figure III.24: Effort maximal des structures tissées 3D interlocks chaînes à base de fils de sisal

Les valeurs de déformation à la rupture en traction des structures tissées 3D interlocks chaînes sont présentées dans les Figure III.26 et Figure III.27. La déformation à la rupture de ces structures est proportionnelle aux valeurs d'embuvage et de retrait, ce qui peut être constaté sur les courbes de la Figure III.25.

Sur la base de la déformation à la rupture dans la direction chaîne, les structures peuvent être distinguées en trois groupes différents (Figure III.25) et selon 3 autres groupes dans la direction trame (Figure III.26). En direction chaîne la déformation à la rupture des structures O-L 4 1-3 Liage Sergé 3 et A-L 4 5-3 Liage Sergé 6 (groupe GP1Wa) est comprise entre 0 et 5%. Ceci est principalement dû aux valeurs de l'embuvage des fils qui sont inférieures à 6%. Cependant, la déformation à la rupture des structures O-L 4 2-3 Liage Sergé 3 et O-T 4 2-4 Liage Natté 4-2 (groupe GP2Wa) est comprise entre 5% et 10%. Cela est justifié par les valeurs de l'embuvage des fils au sein de ces structures entre 5% et 10%. Sur la même tendance, les valeurs de l'embuvage des fils au sein des structures A-T 4 5-4 Liage sergé 6 façonné et O-T 4 5-4 Liage sergé 6 façonné (groupe GP3Wa) dépassent les 10% et pour lesquelles la déformation à la charge maximale est comprise entre 10% et 15%.

III. Étude des structures fibreuses de sisal à l'échelle tissu

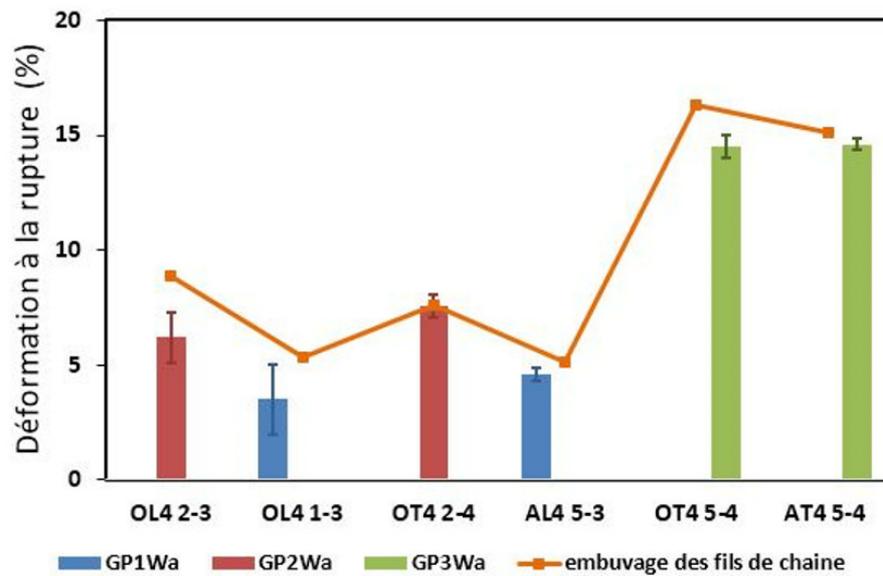


Figure III.25: Déformation à la rupture des structures tissées 3D interlocks chaînes à base de fils de sisal dans la direction chaîne

Dans la direction trame, les gammes de valeur de déformation à la rupture des structures tissées 3D interlocks chaînes sont du même ordre de grandeur que celles dans la direction chaîne. Le groupe GP1We comprend la structure O-L 4 2-3 Liage Sergé 3, le groupe GP2We comprend les structures O-L 4 1-3 Liage Sergé 3, O-T 4 2-4 Liage Natté 4-2, A-L 4 5-3 Liage Sergé 6 et O-T 4 5-4 Liage sergé 6 façonné et le groupe GP3We comporte la structure A-T 4 5-4 Liage sergé 6 façonné.

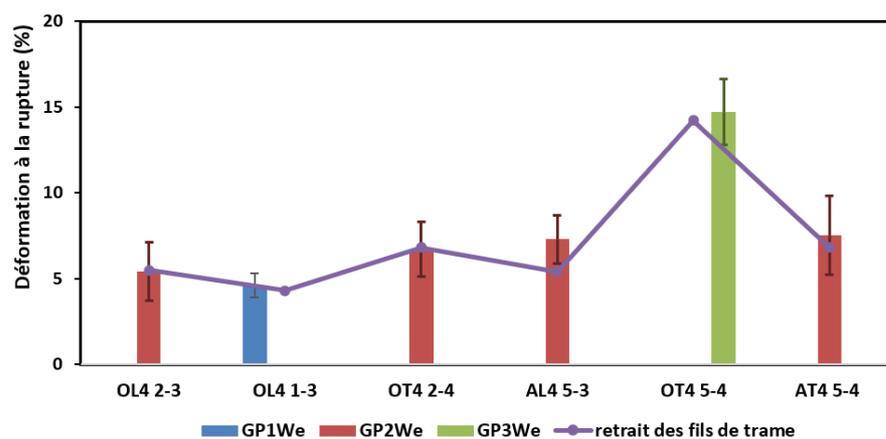


Figure III.26: Déformation à la rupture des structures tissées 3D interlocks chaînes à base de fils dans la direction trame

III. Étude des structures fibreuses de sisal à l'échelle tissu

III.3.3.2.2. Propriétés en flexion des structures tissées 3D interlocks chaines

III.3.3.2.2.1. Présentation de l'essai de flexion

Les propriétés en flexion des structures tissées 3D interlocks chaines ont été analysées selon la norme ISO 4604 [190] en suivant le principe du test cantilever décrit dans la section III.2.3.2.2.1.

III.3.3.2.2.2. Caractérisation en flexion des structures tissées 3D interlocks chaines

Le coefficient de rigidité en flexion des structures tissées 3D interlocks chaines est présenté en Figure III.27. Le coefficient de rigidité en flexion de ces structures est toujours plus faible dans la direction trame que la direction chaîne. Cette plus faible valeur dans la direction trame est attribuée à l'ondulation des fils de chaîne de liage dans l'épaisseur de la structure. La structure O-T 4 2-4 Liage Natté 4-2 représente la structure la plus rigide en flexion dans les deux directions (chaîne et trame).

En général, la masse surfacique des structures tissées a un impact important sur la rigidité à la flexion [191]. De même, une corrélation a été observée entre la masse surfacique des structures tissées 3D interlocks chaines et le coefficient de la rigidité en flexion des structures tissées 3D interlocks chaines.

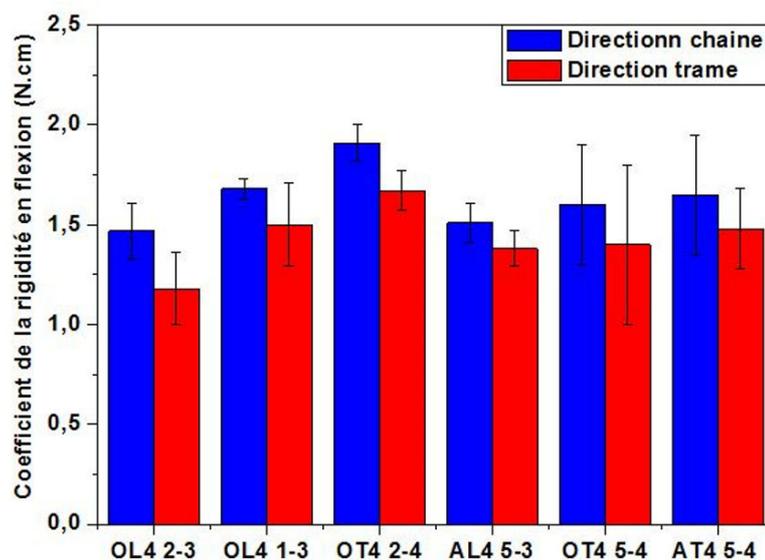


Figure III.27: Coefficient de rigidité en flexion des structures tissées 3D interlocks chaines à base de fils de sisal

III. Étude des structures fibreuses de sisal à l'échelle tissu

III.3.3.2.3. Propriétés en compaction des structures tissées 3D interlocks chaines

III.3.3.2.3.1. Présentation de l'essai de compaction

Les propriétés en compaction des structures tissées 3D interlocks chaines ont été étudiées en suivant le même protocole expérimental décrit dans la section III.2.3.2.3.1. Un pli des structures tissées 3D interlocks chaines a été déposé entre les deux plaques.

III.3.3.2.3.2. Caractérisation du comportement en compaction

Le comportement en compaction des structures tissées 3D interlocks chaines à base de fils de sisal est présentée en Figure III.28. L'allure des courbes de compaction des structures tissées 3D interlocks chaines suit la même évolution de l'allure des courbes des structures tissées 2D (Figure III.16). La structure O-T 4 2-4 Liage Natté 4-2 est la structure qui prend le plus de temps pour se compacter en épaisseur, ce qui est lié au type d'insertion des fils de chaîne de liage au travers de l'épaisseur couplé à la densité des fils de chaîne et de trame et la masse surfacique. La fraction volumique des structures tissées 3D interlocks chaines à base de fils de sisal varie entre 32 et 53%.

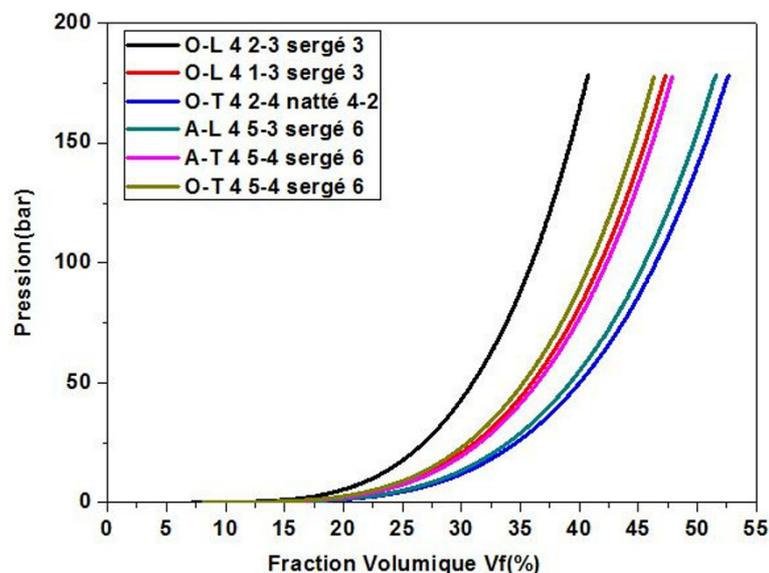


Figure III.28 : Comportement en compaction des structures tissées 3D interlocks chaines

III. Étude des structures fibreuses de sisal à l'échelle tissu

III.3.3.2.4. Analyse des propriétés mécaniques des tissus 3D interlocks chaines

Pour conclure sur l'analyse des propriétés mécaniques des structures tissées 3D interlocks chaines, le comportement en traction de ces structures dépend du type d'architecture (type insertion des fils de chaîne de liage et positionnement des fils de chaîne de renfort). Les valeurs d'embuvage et de retrait des fils semblent également influencer sur la déformation à la rupture de ces structures. Le comportement en flexion des tissées 3D interlocks chaines dépend de l'insertion des fils de chaîne de liage au sein de ces structures. Le comportement en compaction de ces structures dépend du type d'insertion des fils de chaîne de liage, de la densité des fils de chaîne et de trame et de la masse surfacique de ces structures.

III.4. Conclusion

Dans ce chapitre, les différentes propriétés des structures tissées 2D et 3D interlocks chaines ont été analysées pour comprendre et faciliter la mise en œuvre de ces structures en tant que renforts fibreux pour des matériaux composites.

En premier lieu, les structures tissées bidirectionnelles 2D ont été fabriquées et analysées selon les normes. La première étape a consisté à concevoir les architectures de six structures à l'aide des logiciels de modélisation géométrique (Wisetex, DB Weave). Le procédé de fabrication des structures tissées 2D correspond au procédé de tissage conventionnel sur une machine à tisser d'échantillonnage ARM au sein du laboratoire GEMTEX. Le procédé de tissage s'est décomposé en plusieurs étapes successives telles que : la préparation des fils de chaîne par ourdissage direct, puis le rentrage des fils de chaîne sur la machine à tisser selon un plan de rentrage sauté, et enfin par le tissage avec insertion des fils de trame par navette. Après la fabrication des six structures, les échantillons de ces structures ont été conditionnés dans une atmosphère contrôlée ($20 \pm 2,0^\circ\text{C}$, $65 \pm 4,0\%$). Les structures tissées 2D ont été réparties en deux groupes de structures, le groupe A comportant les structures les moins denses et le groupe B comprenant les structures les plus denses. Les résultats obtenus ont montré que la densité des fils de chaîne et de trame dépend du type d'armure. La structure satin 8 représente la structure la plus dense dans les deux directions chaîne et trame. Ensuite, les valeurs d'embuvage et de retrait des fils extraits des structures tissées 2D ont été mesurés afin d'étudier l'ondulation des fils au sein de ces structures. Les structures natté 2-2 et natté 4-4 représentent les structures les plus équilibrées dans les deux directions chaîne et trame vis-à-vis de l'ondulation des fils au sein de ses structures. Contrairement aux autres structures, les structures croisé 2-2 et croisé 4-

III. Étude des structures fibreuses de sisal à l'échelle tissu

4 présentent un embuvage des fils de chaîne supérieur au retrait des fils de trame. Alors que les structures satin 4 et satin 8 représentent un retrait des fils de trame supérieur à l'embuvage des fils de chaîne. Cette différence significative est liée au type d'armure. La densité des fils et le type d'armure influent directement sur la masse surfacique et l'épaisseur des structures tissées 2D. Ensuite, les propriétés en traction des structures tissées 2D ont été analysées en utilisant une machine de traction INSTRON 5890 250 KN. L'effort maximal à rupture des structures tissées 2D à base de fils de sisal dépend du type d'armure et de la densité des fils dans les directions chaîne et trame. La déformation à rupture des structures tissées 2D dépend également des valeurs d'embuvage et de retrait des fils au sein des structures tissées 2D. Puis, les propriétés en flexion ont été analysées en se basant sur le principe du test cantilever. Les valeurs du coefficient de rigidité en flexion des structures tissées 2D du groupe A sont inférieures aux valeurs du coefficient de rigidité en flexion des structures tissées 2D du groupe B. Cette différence des valeurs du coefficient de rigidité en flexion des structures tissées 2D est attribuée à la densité des fils la plus élevée des structures tissées 2D du groupe B par rapport à celle des structures tissées 2D du groupe A. Ensuite, les propriétés en compaction des structures tissées 2D ont été analysées en déterminant la fraction volumique de fibres obtenue après le test de compaction. Les structures tissées 2D du groupe A présentent un comportement très similaire avec une fraction volumique maximale de fibres d'environ 35%, alors que les structures tissées 2D du groupe B présentent un comportement très similaire avec une fraction volumique maximale de fibres d'environ 45%.

En deuxième lieu, les différentes propriétés des structures tissées 3D interlocks chaînes ont été analysées pour mieux comprendre le comportement de ces structures. Six architectures ont été conçues en identifiant le positionnement des différents fils au sein de ces structures. Ces structures ont été fabriquées selon le même procédé de tissage conventionnel. Les propriétés des structures tissées 3D interlocks chaînes ont été analysées en déterminant la densité des fils, l'épaisseur, l'embuvage, le retrait et la masse surfacique. Initialement, la densité des fils de chaîne par couche est identique pour toutes les structures tissées 3D interlocks chaînes car ils ont été fabriqués avec même piquage au peigne sur machine à tisser. La valeur de la densité des fils de chaîne mesurée sur la surface supérieure des structures tissées 3D interlocks chaînes est égale à 3 fils/cm. Cependant, la différence observée par rapport à la densité des fils de trame est liée à l'armure des fils de chaîne de liage au sein de ces structures. L'embuvage des fils de chaîne de liage est généralement supérieur par rapport à l'embuvage des fils de chaîne de renfort

III. Étude des structures fibreuses de sisal à l'échelle tissu

pour les différentes structures tissées 3D interlocks chaines. Le retrait des fils de trame des structures tissées 3D interlocks chaines suit la même tendance de l'évolution de l'embuvage des fils de liage des structures tissées 3D interlocks chaines. Ensuite, les propriétés mécaniques de ces structures ont été analysées en montrant l'influence du type d'architecture sur l'effort maximal et de l'embuvage et le retrait des fils sur la déformation à la rupture de ces structures. Ensuite, les propriétés en flexion de ces structures ont été étudiées en déterminant le coefficient de rigidité en flexion de ces structures. Cette caractéristique dépend directement de la masse surfacique et du type d'insertion des fils de chaîne de liage. Puis, les propriétés en compaction de ces structures ont été étudiées en déterminant la fraction volumique des fibres obtenue qui varie entre 32 et 53% selon le type d'architecture utilisé.

Les résultats obtenus en analysant les différentes propriétés des structures tissées 2D et des structures tissées 3D interlocks chaines ont montré la performance mécanique des différentes structures en tant que renfort fibreux pour matériaux composites. Par la suite, les travaux présentés porteront sur l'élaboration et la caractérisation des matériaux composites renforcés par les structures tissées 2D et les structures tissées 3D interlocks chaines à base de fils de sisal.

IV. Élaboration et caractérisation des matériaux composites à base des fibres de sisal

IV.1. Introduction

La performance des matériaux composites s'appuie principalement sur les caractéristiques du renfort mais également sur la maîtrise de la phase d'imprégnation. Le renfort sous différentes architectures, permet de répondre aux exigences industrielles spécifiques. Les structures tissées sont, parmi les architectures présentées au chapitre I, les plus utilisées en tant que renfort des matériaux composites pour leurs performances mécaniques et leur stabilité dimensionnelle. Les propriétés des structures tissées 2D et 3D Interlock chaîne à base de fils de sisal, et avant imprégnation, ont été identifiées et analysées dans le chapitre précédent. La mise en œuvre des matériaux composites à base de ces structures ainsi que les caractérisations associées font l'objet des travaux présentés dans ce chapitre.

Dans un premier temps, ce chapitre portera sur la mise en œuvre par infusion sous vide des matériaux composites renforcés par les structures tissées 2D à base de fils de sisal ainsi que la caractérisation physique et mécanique de ces matériaux. Dans un second temps, les matériaux composites à base des structures tissées 3D Interlocks chaînes seront élaborés en suivant le même procédé utilisé pour les matériaux composites présentés dans la première partie. Puis leurs propriétés mécaniques et physiques seront identifiées et analysées.

IV.2. Mise en œuvre des matériaux composites à base des structures tissées bidirectionnelles 2D

IV.2.1. Matériau utilisé

Les renforts tissés choisis pour l'élaboration des matériaux composites sont les structures tissées 2D à base de fils de sisal, analysées au chapitre précédent. Les six architectures décrites (Figure IV.1) ont été choisies pour évaluer l'influence du type d'architecture des structures tissées 2D sur la performance des matériaux composites. Le nombre de plis de ces structures au sein des matériaux composites a varié entre un seul pli et deux plis afin d'étudier l'influence de

IV. Élaboration et caractérisation des matériaux composites à base des fibres de sisal

la fraction volumique de fibres sur les caractéristiques obtenues.

La matrice utilisée est une résine époxy SR8200 associée à un durcisseur SD7204 fourni par SICOMIN, avec une proportion massique de 100 g de résine pour 37 g de durcisseur. Le mélange résine/durcisseur (SR8200/SD7204) a une résistance à la traction de 44 MPa, un Module de traction de 3,01 GPa et une déformation à rupture de 1,7%.

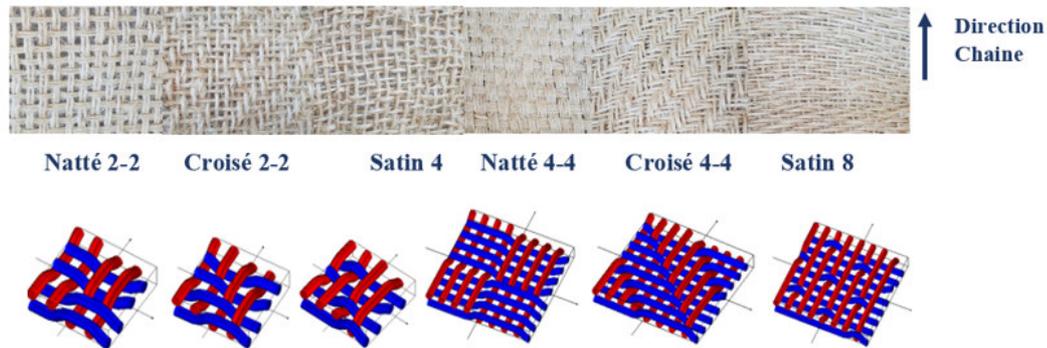


Figure IV.1: Six structures tissées 2D utilisées pour le renforcement des matériaux composites

IV.2.2. Procédé d'élaboration (Infusion sous vide)

Le procédé d'élaboration des matériaux composites à base des structures tissées 2D est le procédé d'infusion sous vide. Le principe de base de ce procédé consiste à déposer les couches de renforts dans un moule, puis les différents consommables (tissu d'arrachage, grille d'infusion de résine). La fermeture du moule se fait par une bâche et l'injection de la résine s'opère à l'aide d'une pompe à vide. Ce procédé d'infusion sous vide a été optimisé pour garantir une bonne imprégnation des renforts tissés 2D. La modification du procédé d'élaboration a consisté à déposer en premier le tissu d'arrachage et la grille d'infusion, puis les renforts tissés. Le durcissement de la résine époxy a été effectué à température ambiante sous pression de 1 bar durant 24 heures. Pour garantir une surface lisse sur les deux faces des plaques composites réalisées, une plaque métallique a été déposée avant la fermeture du moule par la bâche. Le procédé d'élaboration utilisé (Figure IV.2 et Figure IV.3) comprend les étapes suivantes :

- Découpe des tissus 2D à base de fils de sisal selon la dimension (20x20 mm²).
- Dépôt du tissu téflon sur le moule nettoyé à l'acétone.

IV. Élaboration et caractérisation des matériaux composites à base des fibres de sisal

- Dépôt de l'ensemble {tissu d'arrachage, grille d'infusion, renfort, tissu d'arrachage, grille d'infusion, tissu d'arrachage, plaque métallique} avec des joints d'étanchéité.
- Fermeture du moule par une bâche.
- Mise sous vide à l'aide de la pompe.
- Injection du mélange (résine/durcisseur) liquide dans le moule fermé.
- Polymérisation du mélange (résine/durcisseur).
- Démoulage.



Figure IV.2: Schéma du protocole d'infusion sous vide utilisé

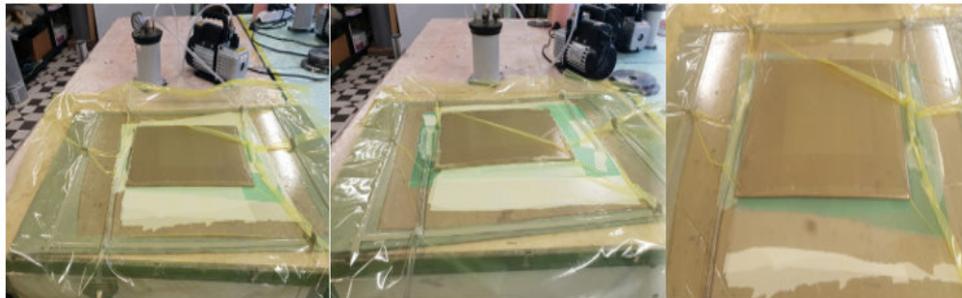


Figure IV.3: Montage utilisé pour l'élaboration des matériaux composites

La première campagne de réalisation des matériaux composites concerne les éprouvettes fabriquées à partir d'un seul pli, pour chaque architecture de tissus 2D. La deuxième campagne a été effectuée à l'aide de deux plis orientés à 0° de chaque architecture de tissus 2D.

IV.2.3. Caractérisation des matériaux composites à base des structures tissées bidirectionnelles 2D

Après la fabrication des différentes plaques composites, les éprouvettes sont découpées à

IV. Élaboration et caractérisation des matériaux composites à base des fibres de sisal

l'aide d'une scie sauteuse. Les dimensions des éprouvettes ont dépendu du type d'essai de caractérisation (essai de traction : 300 x 50mm², essai de flexion : 60 x 15 mm², essai au choc Charpy : 60 x 15 mm²). Les éprouvettes ont été conditionnées dans une atmosphère contrôlée (20°C, 61%). La désignation des plaques composites à base des structures tissées 2D est donnée dans le Tableau IV-1.

Tableau IV-1 : Désignation des plaques composites à base des structures tissées 2D

Plaques Composites	Architectures des renforts
CN2-2	Natté 2-2
CC2-2	Croisé 2-2
CS4	Satin 4
CN4-4	Natté 4-4
CC4-4	Croisé 4-4
CS8	Satin 8

IV.2.3.1. Propriétés physiques

Les propriétés physiques des matériaux composites permettent d'identifier l'épaisseur, la densité, la fraction volumique des fibres et la porosité des matériaux composites. Ces caractéristiques ont été analysées selon les normes.

IV.2.3.1.1.Épaisseur

L'épaisseur des éprouvettes a été mesurée à l'aide d'un pied à coulisse sur une surface de 100 x 100 mm². La valeur moyenne de l'épaisseur a été calculée à partir des mesures effectuées en 10 points sur la surface de l'éprouvette.

Les épaisseurs des plaques composites réalisées avec un et deux plis de renfort sont reportées dans la Figure IV.4. Les valeurs montrent une épaisseur moyenne d'environ 5 et 6 mm pour respectivement les structures élaborées à partir d'un et de deux plis. L'épaisseur des plaques composites est moins importante que celle des renforts secs (Figure III.8), d'environ 16% pour un seul pli et de 30% relativement à l'empilement de 2 plis secs.

IV. Élaboration et caractérisation des matériaux composites à base des fibres de sisal

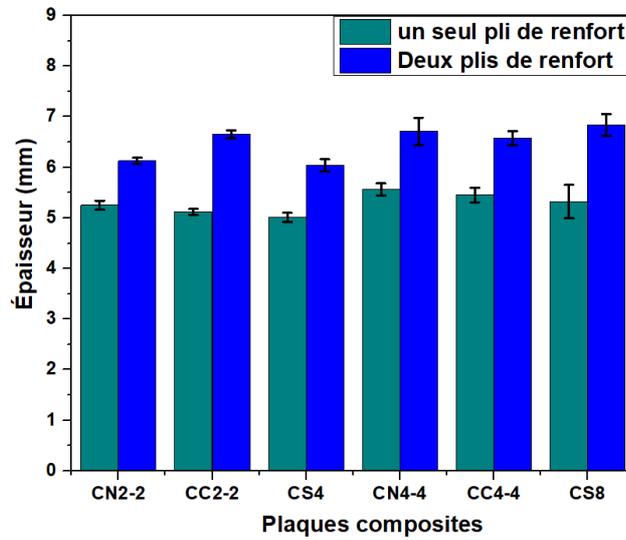


Figure IV.4: Épaisseur des plaques composites à base des structures tissées 2D, la désignation des plaques composites est donnée dans le Tableau IV-1

IV.2.3.1.2. Fraction volumique des fibres et de porosités

La fraction volumique des fibres (V_f) au sein des plaques composites dépend généralement du type de renfort, de résine, du procédé d'élaboration et de l'adhésion entre le renfort et la résine. La fraction volumique des fibres (V_f) a été calculée selon les équations (IV.1) et (IV.2) en fonction du volume et de la masse des plaques composites réalisées, de la densité de la fibre de sisal considérée à $1,45 \text{ g/cm}^3$ (calculée dans le chapitre II) et de la densité de la résine égale à $1,2 \text{ g/cm}^3$ (selon la fiche technique).

$$m_c = m_m + \rho_f \times V_f \quad (\text{IV.1})$$

$$V_f = \frac{m_c - m_m}{\rho_f} \quad (\text{IV.2})$$

Avec :

m_c est la masse mesurée des plaques composites, m_m est la masse de la résine, ρ_f est la densité de la fibre de sisal de $1,45 \text{ g/cm}^3$ et V_f est la fraction volumique des fibres (%).

La porosité est un paramètre important influençant les propriétés mécaniques des matériaux composites. Le taux volumique de porosités est calculé (équation (IV.3)) en fonction du taux volumique des fibres et de la résine.

IV. Élaboration et caractérisation des matériaux composites à base des fibres de sisal

$$V_p = 100 - V_m - V_f \quad (\text{IV.3})$$

Avec :

V_m est la fraction volumique de la résine, V_f est la fraction volumique des fibres et V_p est la fraction volumique de la porosité.

Le Tableau IV-2 présente les fractions volumiques de fibres, de résine et de porosités des plaques composites réalisées. La fraction volumique de fibres des plaques composites réalisées à base de deux plis de renfort est supérieure à celle des plaques composites à base d'un seul pli de renfort. La fraction volumique de fibres des plaques composites à base d'un seul pli des structures tissées 2D dépend fortement de la masse surfacique des structures tissées 2D (Figure III.9). Les valeurs obtenues de fraction volumique de fibres des plaques composites varient en fonction des structures tissées 2D à base de fils de sisal. L'augmentation de la fraction volumique de fibres évolue entre 33,51 à 62,48% avec le nombre de plis de renfort. La fraction volumique des fibres des plaques composites réalisées à base de fils de sisal est cohérente avec celles obtenues dans les travaux de la littérature concernant les matériaux composites à base des fibres naturelles [195], [196]. Le taux volumique de porosités est entre 3 à 5%, ce qui montre la bonne imprégnation des structures tissées 2D à base de fils de sisal.

Tableau IV-2: Fraction volumique des fibres, de la résine et de la porosité des plaques composites à base des structures tissées 2D

Nombre de plis de renfort	Architectures du renfort	Fraction volumique de la résine(%)	Fraction volumique des fibres(%)	Fraction volumique de la porosité(%)
1 pli	Natté 2-2	75,66±15,65	21,08±7,32	3,26±0,56
	Croisé 2-2	78,49±5,21	18,08±2,65	3,43±0,97
	Satin 4	78,74±10,63	16,9±2,87	4,36±0,53
	Natté 4-4	67,56±12,74	29,46±9,63	2,98±0,27
	Croisé 4-4	71,26±10,64	25,62 ±5,63	3,12±0,52
	Satin 8	71,32±12,64	25,03±6,52	3,65±0,52
2 plis	Natté 2-2	61,55±9,42	35,18±6,52	2,65±0,23
	Croisé 2-2	70,54±3,86	24,14±8,75	5,32±1,42
	Satin 4	71,81±9,63	24,66±4,53	3,53±0,53
	Natté 4-4	57,58±6,64	37,94±13,65	4,48±0,26
	Croisé 4-4	59,77±9,53	35,8±8,64	4,43±0,42
	Satin 8	53,9±10,75	40,67±14,76	5,43±0,43

IV. Élaboration et caractérisation des matériaux composites à base des fibres de sisal

IV.2.3.1.3. Densité

La densité des plaques composites réalisées est déterminée à l'aide de l'équation (IV.4), en fonction de la masse et du volume des plaques composites.

$$\rho_c = \frac{m_c}{V_c} \quad (\text{IV.4})$$

Avec :

ρ_c est la densité des plaques composites (g/cm^3), m_c est la masse des plaques composites (g) et V_c est le volume des plaques composites (cm^3).

Le Tableau IV-3 présente la densité des plaques composites réalisées. Les valeurs pour les différentes plaques montrent la faible densité par rapport à celles de composites à base de fibre de verre [197]. Les plaques composites à base de deux plis de renforts montrent une augmentation légère de la densité par rapport à celle des plaques composites à base d'un seul pli de renfort.

Tableau IV-3: La densité des plaques composites réalisées à base des structures tissées 2D

Nombre de plis de renfort	Architectures du renfort	Densité (g/cm^3)
1 pli	Natté 2-2	1,21±0,08
	Croisé 2-2	1,22±0,06
	Satin 4	1,21±0,05
	Natté 4-4	1,23±0,04
	Croisé 4-4	1,22±0,1
	Satin 8	1,24±0,07
2 plis	Natté 2-2	1,28±0,03
	Croisé 2-2	1,26±0,02
	Satin 4	1,25±0,08
	Natté 4-4	1,29±0,04
	Croisé 4-4	1,28±0,08
	Satin 8	1,31±0,06

IV.2.3.1.4. Taux de reprise d'humidité

L'utilisation des fibres naturelles comme alternative aux fibres synthétiques pour le renforcement des matériaux composites à grande échelle met en question les problématiques observées liées à la composition chimique des fibres naturelles. Parmi ces problématiques, la

IV. Élaboration et caractérisation des matériaux composites à base des fibres de sisal

nature hydrophile des fibres naturelles qui influence la durabilité des matériaux composites en présence d'humidité. De ce fait, le taux de reprise d'humidité des plaques composites réalisées a été étudié selon la norme ASTM D5229 [198]. Les éprouvettes testées ont été découpées sur des dimensions de 20×20 mm². La détermination de cette capacité de reprise d'humidité est basée sur le suivi gravimétrique de la masse des éprouvettes conditionnées à une atmosphère contrôlée (21°C, 61%). L'évolution de taux de reprise d'humidité des plaques composites réalisées a été calculée en utilisant l'équation (IV.5):

$$m_H (\%) = \frac{m(t) - m_0}{m_0} \times 100 \quad (\text{IV.5})$$

Avec :

$m_H(t)$ est la teneur en humidité de l'éprouvette à chaque instant (t) (%), m_0 est la masse initiale de l'éprouvette (g) et $m(t)$ est la masse de l'éprouvette à chaque instant (t) (g).

La diffusion de l'humidité au sein des plaques composites a été analysée à l'aide du modèle de diffusion de la loi de Fick [199]–[202].

Les matériaux composites sont généralement modélisés par un matériau avec une section rectangulaire pour définir le comportement diffusif de ces matériaux. L'évolution de la teneur en humidité des plaques composites suit le modèle de diffusion Fickien. Les paramètres de diffusion ont été déterminés pour décrire la vitesse du processus de diffusion de l'eau (Coefficient de diffusion (D)) en utilisant l'équation (IV.6) et la perméabilité des molécules d'eau à travers des plaques composites (Coefficient de perméabilité P) en utilisant les équations (II.5) et (II.6) du chapitre II.

$$D = \pi \left[\frac{e}{4M_m} \right]^2 \left[\frac{M_2 - M_1}{\sqrt{t_2} - \sqrt{t_1}} \right]^2 \quad (\text{IV.6})$$

Avec : e qui représente l'épaisseur des plaques composites (mm), M_m correspond à la teneur en humidité à l'état de saturation (%), t_1 et t_2 sont les points sélectionnés dans la partie linéaire initiale de la courbe « teneur en humidité- temps », M_1 et M_2 sont les teneurs en humidité correspondants aux points sélectionnées de la partie linéaire.

Les Figure IV.5 et Figure IV.6 représentent les courbes « teneur en humidité – temps » des plaques composites. L'allure de la courbe est similaire celle décrivant l'absorption de

IV. Élaboration et caractérisation des matériaux composites à base des fibres de sisal

l'humidité de la fibre de sisal (Figure II.7). L'absorption de l'humidité par les plaques composites passent par les mêmes phases que celles à l'échelle de la fibre de sisal (évoqué section II.2.3.2 du chapitre II). La fraction volumique de fibres des plaques composites réalisées influe sur le taux de reprise d'humidité de ces composites. La proportion élevée des fibres au sein des plaques composites permet d'augmenter la sensibilité à l'humidité de ces plaques, ce qui est dû à la nature hydrophile de la fibre de sisal. Les plaques composites à base de deux plis de la structure tissée natté 4-4 représente les plaques composites les plus sensibles à l'humidité avec une teneur maximale en humidité de 29,35%. La teneur en humidité des plaques composites à base des structures tissées 2D est cohérente avec la teneur en humidité des matériaux composites à base de fibres naturelles [203].

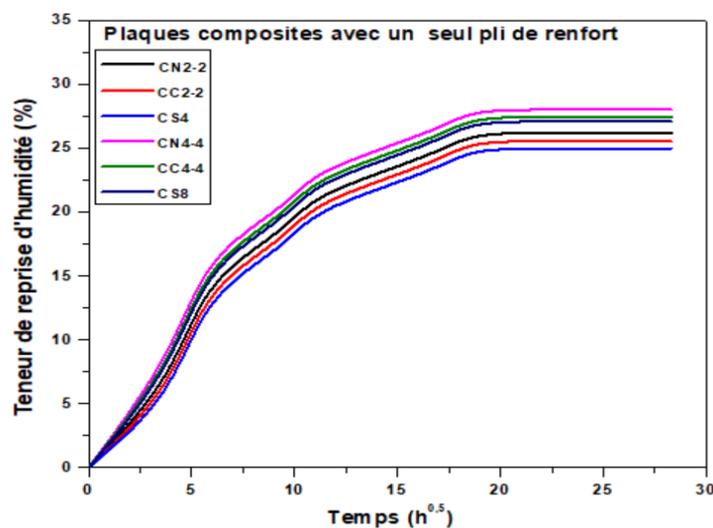


Figure IV.5: Courbes « teneur en humidité – temps » des plaques composites à base d'un seul pli de tissu 2D

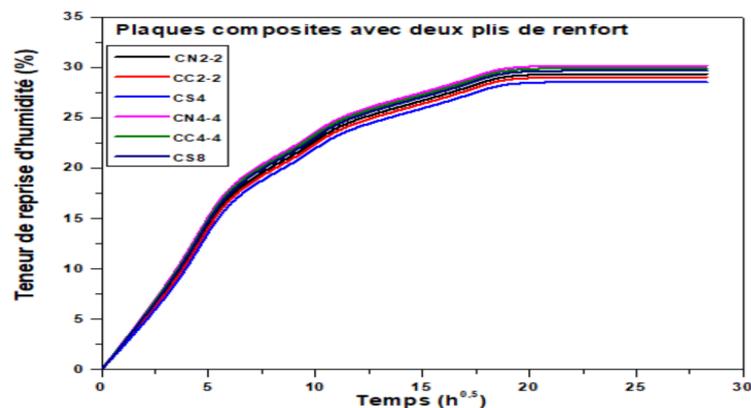


Figure IV.6: Courbes « teneur en humidité – temps » des plaques composites à base de deux plis de tissu 2D

IV. Élaboration et caractérisation des matériaux composites à base des fibres de sisal

Le Tableau IV-4 présente les paramètres de diffusion en eau au sein des plaques composites réalisées. Le coefficient de diffusion dépend principalement de la fraction volumique de fibres. Plus la fraction volumique est importante plus le coefficient de diffusion est important. Le comportement diffusif de l'humidité au sein des plaques composites réalisées est similaire à celui des matériaux composites à base des fibres naturelles étudié dans la littérature [10],[11].

Tableau IV-4: Paramètres de diffusion de l'absorption de l'humidité des plaques composites à base des structures tissées 2D

Nombre de plis de renfort	Architectures du renfort	Coefficient de diffusion D (*10 ⁻⁷ mm ² /s)	Coefficient de perméabilité P (*10 ⁻⁷ mm ² /s)
1 pli	Natté 2-2	2,74±0,12	3,25±0,14
	Croisé 2-2	2,09±0,14	2,36± 0,15
	Satin 4	1,89±0,13	2,2±0,17
	Natté 4-4	3,45±0,17	3,9±0,25
	Croisé 4-4	3,12±0,21	3,66±0,28
	Satin 8	3,02±0,17	3,59±0,32
2 plis	Natté 2-2	3,78±0,18	4,3±0,42
	Croisé 2-2	3,08±0,23	3,88±0,24
	Satin 4	3,23±0,1	4,26±0,22
	Natté 4-4	4,26±0,15	5,49±0,51
	Croisé 4-4	3,98±0,22	5,23±0,42
	Satin 8	4,56±0,11	4,97±0,25

IV.2.3.1.5.Conclusion

Pour conclure sur les propriétés physiques des plaques composites à base des tissus 2D, l'épaisseur des plaques composites est influencée légèrement par le nombre de couches de renforts. La fraction volumique des fibres au sein des plaques composites dépend clairement du type d'architecture et de la masse surfacique des renforts. Le comportement diffusif de l'humidité des plaques composites réalisées à base tissu 2D dépend principalement de la fraction volumique des fibres.

IV.2.3.2. Propriétés mécaniques

L'étude du comportement mécanique des plaques composites permet d'évaluer la performance de ces composites. Les principales propriétés mécaniques identifiées dans ces travaux sont celles en traction, en flexion ainsi qu'à l'impact Charpy.

IV. Élaboration et caractérisation des matériaux composites à base des fibres de sisal

IV.2.3.2.1. Propriétés mécaniques en traction

IV.2.3.2.1.1. Présentation de l'essai de traction

L'essai de traction des plaques composites a été effectué selon la norme NF ISO 527-4 [167], sur un banc de traction INSTRON 5980 250 KN (Figure IV.7). Les éprouvettes testées ont été découpées aux dimensions nécessaires ($250 \times 25 \text{ mm}^2$). La vitesse de l'essai est de 2mm/min avec une longueur entre les mors de 150 mm. Cinq éprouvettes de chaque type de plaques composites réalisées ont été testées dans les deux directions chaîne et trame. Le module de traction a été calculé sur la gamme de déformation entre 0,3 et 0,5%.

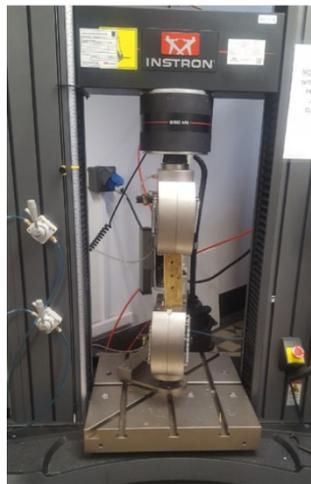


Figure IV.7: Essai de traction sur une plaque composites sur le banc INSTRON 5890 250 KN

IV.2.3.2.1.2. Caractérisation en traction

Les Figure IV.8 et Figure IV.9 donnent les valeurs de la contrainte à rupture en traction des composites à base, respectivement d'un et de deux plis. Les résultats montrent que la contrainte à rupture en traction des plaques composites à base d'un seul pli dépend du type d'architecture et de la fraction volumique des fibres. Les éprouvettes avec les fractions volumiques de fibres les plus importantes (CN4-4, CC4-4, CS8) conduisent aux valeurs de contrainte à rupture en traction les plus élevées. Pour les plaques composites à base de deux plis de tissus 2D, la contrainte à rupture en traction dépend également de la fraction volumique des fibres.

Les plaques composites à base d'un seul pli de tissus (croisé 2-2, satin 4, croisé 4-4) présentent une valeur similaire de la contrainte à rupture en traction dans les deux directions,

IV. Élaboration et caractérisation des matériaux composites à base des fibres de sisal

ce qui montre un comportement équilibré de ces plaques dans les deux directions. A l'inverse, les plaques composites à base de deux plis de tissus (natté 2-2, natté 4-4) présentent une valeur élevée de la contrainte à rupture en traction dans la direction chaîne par rapport à la direction trame. Ces résultats obtenus suivent la même tendance d'évolution du comportement en traction des tissus 2D (croisé 2-2, satin 4, croisé 4-4) (section III.2.3.2.1.2, chapitre III).

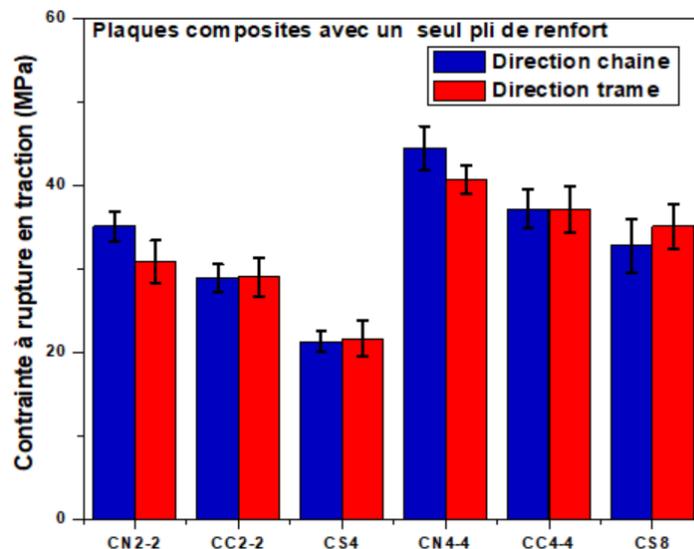


Figure IV.8: Contrainte à rupture en traction des composites à base d'un seul pli de tissu 2D

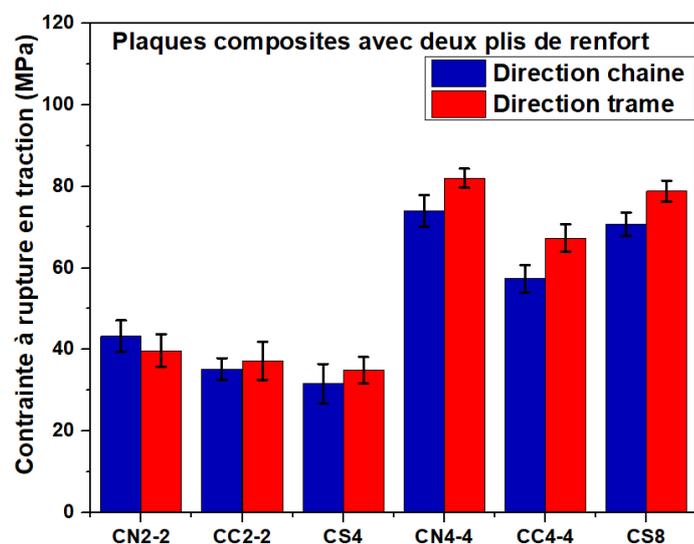


Figure IV.9: Contrainte à rupture en traction des composites à base de deux plis de tissu 2D

Les Figure IV.10 et Figure IV.11 donnent les valeurs du module de traction des plaques composites à base, respectivement d'un et de deux plis. Le module de traction des plaques

IV. Élaboration et caractérisation des matériaux composites à base des fibres de sisal

composites est influencé clairement par l'architecture des tissus. Les résultats obtenus montrent que les structures tissées 2D avec une faible valeur d'embuvage et de retrait des fils (satin 4 et satin 8) conduisent à une valeur élevée du module de traction des plaques composites réalisées à base d'un seul pli de ces structures. Les valeurs du module de traction des plaques composites à base d'un seul pli des structures natté 2-2 et natté 4-4 sont similaires dans les deux directions chaîne et trame. Cette similarité des valeurs du module de traction est liée aux valeurs identiques de l'embuvage et du retrait des fils au sein de ces structures (section III.2.3.1.2, chapitre III). En revanche, la différence observée des valeurs de module de traction des plaques à base d'un seul pli de tissu (satin 4, satin 8, croisé 2-2, croisé 4-4) dans les deux directions chaîne et trame est attribuée à la différence de consommation des fils dans les deux directions au sein de ces structures (satin 4, satin 8, croisé 2-2, croisé 4-4) (section III.2.3.1.1, chapitre III). Furkan et al. [89] ont déjà montré que la faible ondulation des fils de lin au sein d'un tissu toile implique un module de traction élevé des matériaux composites à base de cette structure. Le module de traction des plaques à base de deux plis de tissu 2D suit la même tendance que celle des plaques composites à base d'un seul pli de tissu 2D.

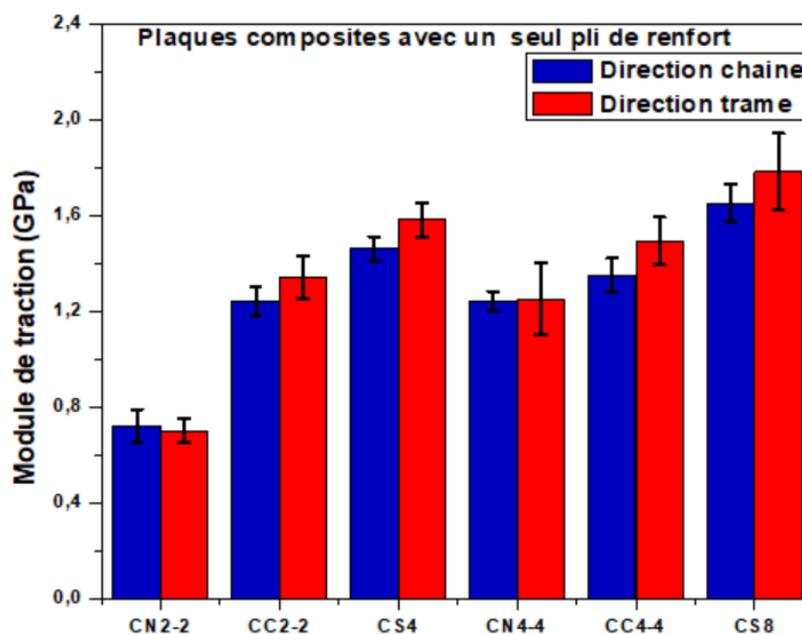


Figure IV.10: Module de traction des plaques composites à base d'un seul pli de tissu 2D

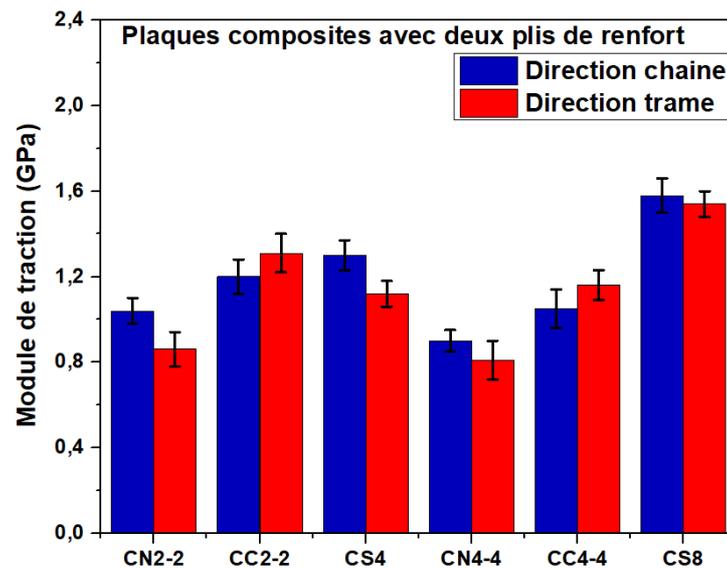


Figure IV.11:Module de traction des plaques composites à base de deux plis de tissus 2D

La déformation à rupture en traction des plaques composites à base de tissus 2D est rapportée dans les Figure IV.12 et Figure IV.13, respectivement pour les plaques à base d'un et de deux plis. Pour les plaques composites réalisées à base d'un seul pli de tissus 2D, les valeurs de déformation à rupture en traction dépendent de l'embuvage et du retrait des fils au sein des tissus (Figure III.6 et Figure III.7). Les plus faibles valeurs de la déformation à rupture en traction des plaques composites réalisées à base d'un seul pli correspondent aux éprouvettes à base des armures satin 4 et satin 8, qui ont les plus faibles valeurs d'embuvage et de retrait comparativement aux autres structures tissées 2D (évoqué au chapitre III). Pour les plaques composites réalisées à base de deux plis de tissus 2D, la déformation à rupture en traction dépend des ondulations des fils au sein des renforts 2D.

IV. Élaboration et caractérisation des matériaux composites à base des fibres de sisal

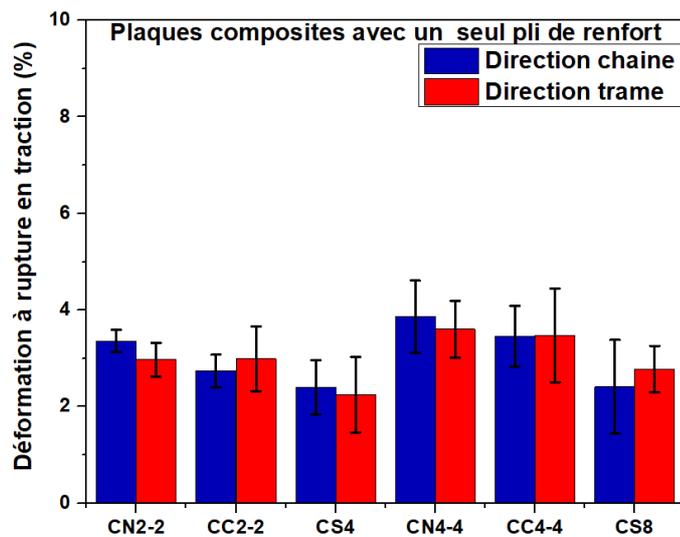


Figure IV.12: Déformation à rupture en traction des composites à base d'un seul pli de tissu 2D

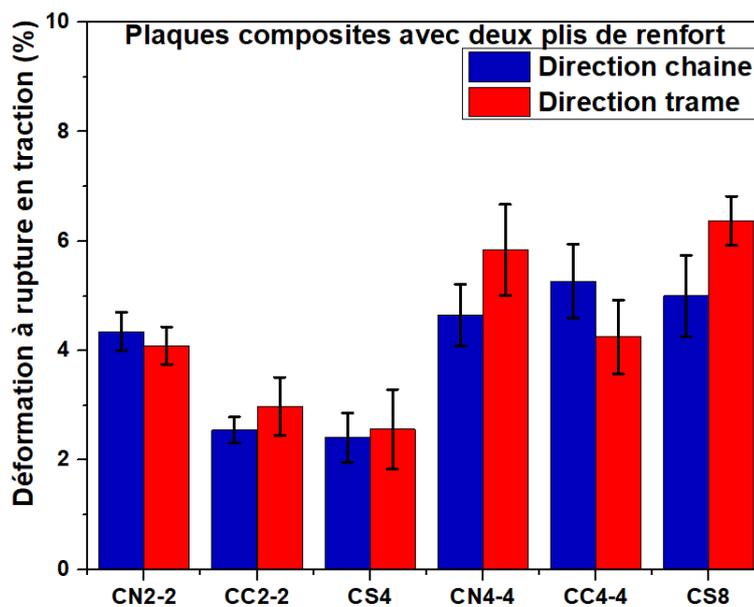


Figure IV.13: Déformation à rupture en traction des composites à base de deux plis de tissu 2D

Le comportement en traction des plaques composites réalisées à base des tissus 2D en sisal conduit à positionner leurs performances en traction par rapport à la littérature. Les caractéristiques en traction (contrainte à rupture et module de traction) des plaques composites sont comparées avec celles de matériaux composites à base de tissu 2D en fibres naturelles et de résine époxy extraites de la bibliographie dans le Tableau IV-5 pour les composites à un pli et dans le Tableau IV-6 pour un nombre supérieur de couche. La contrainte à rupture en traction

IV. Élaboration et caractérisation des matériaux composites à base des fibres de sisal

des plaques composites réalisées à base de tissus croisé 2-2 en fibre de sisal est similaire à celle des plaques composites à base de tissus croisé 2-2 en fibre de bambou. Les structures tissées 2D utilisées comme renfort des plaques composites montrent une meilleure performance en traction par rapport à celle des plaques composites à base de la structure toile en fibre de sisal d'origine indienne. Les valeurs du module de traction des plaques composites réalisées à base des structures tissées 2D en fibre de sisal sont cohérentes avec celles des matériaux composites à base des structures tissées 2D en fibres naturelles (Tableau IV-6).

Tableau IV-5: Comparaison des propriétés de traction des plaques composites à base d'un seul pli de tissu 2D en fibre de sisal avec celles des plaques composites à base de tissus 2D en fibres naturelles

Nombre de plis	Type de Renfort	Fraction Volumique des fibres (%)	Contrainte en rupture de traction (MPa) (direction chaîne)	Module de traction (GPa) (direction chaîne)	Référence
1	Sisal Toile	50	28,34	2,32	[196]
1	Bambou Toile	18	34,57	0,8	[206]
1	Bambou Croisé2-2	18	37,83	0,9	[206]
1	Jute Toile	22	29,65	1,5	[207]
1	Chanvre Toile	20	26,3	0,89	[208]
1	Sisal Natté 2-2	21	21,49	0,75	Ces travaux de thèse
1	Sisal Croisé 2-2	18	35,05	1,21	
1	Sisal Satin 4	16	16,37	1,46	
1	Sisal Natté 4-4	25	37,14	1,24	
1	Sisal Croisé 4-4	29	40,41	1,35	
1	Sisal Satin 8	25	32,71	1,65	

IV. Élaboration et caractérisation des matériaux composites à base des fibres de sisal

Tableau IV-6: Comparaison des propriétés de traction des plaques composites à base de deux plis de tissus 2D en fibre de sisal avec celles des plaques composites à base de tissus 2D en fibres naturelles

Nombre de plis	Type de Renfort	Fraction Volumique des fibres (%)	Contrainte de traction (MPa) (direction chaîne)	Module de traction (GPa) (direction chaîne)	Référence
3	Lin Toile	36,8	40,13	5,45	[195]
3	Jute Toile	20	43,65	4,5	[209]
2	Bambou Croisé 2-2	18	37,83	0,9	[206]
2	Jute Toile	22	29,65	1,5	[207]
3	Chanvre Toile	20	26,3	0,89	[208]
2	Sisal Natté 2-2	35,18	43,25	1,04	Ces travaux de thèse
2	Sisal Croisé 2-2	24,14	35,21	1,2	
2	Sisal Satin 4	24,66	31,57	1,3	
2	Sisal Natté 4-4	37,94	73,99	0,9	
2	Sisal Croisé 4-4	35,8	57,36	1,05	
2	Sisal Satin 8	40,67	70,66	1,58	

IV.2.3.2.2. Propriétés mécaniques en flexion

IV.2.3.2.2.1. Présentation de l'essai de flexion

L'essai de flexion des plaques composites réalisées a été effectuée selon la norme NF ISO 14125 [210]. La dimension des éprouvettes testées est de $80 \times 15 \text{ mm}^2$. Le principe de base de l'essai porte sur l'application de la charge sur une éprouvette rectangulaire reposant sur deux appuis. Le banc de flexion utilisé est le banc INSTRON 5890 avec une vitesse de 1 mm/min. La contrainte à rupture, le module et la déformation à rupture en flexion sont déterminés en fonction de la force appliquée et du déplacement de la traverse (équations (IV.7), (IV.8) et (IV.9)). Cinq éprouvettes de chaque type de plaques composites réalisées ont été testées dans les deux directions chaîne et trame.

$$\sigma = \frac{3 \times F \times L}{2 \times b \times h^2} \quad (\text{IV.7})$$

$$E = \frac{m \times L^3}{4 \times b \times h^2} \quad (\text{IV.8})$$

IV. Élaboration et caractérisation des matériaux composites à base des fibres de sisal

$$\epsilon = \frac{6 \times s \times h}{L^2} \quad (\text{IV.9})$$

Avec :

σ la contrainte à rupture en flexion (MPa),

F la force appliquée à rupture (N),

L la longueur de la portée entre les appuis (64mm),

b la largeur de l'éprouvette (mm),

h l'épaisseur de l'éprouvette (mm).

m la pente initiale de la courbe « charge-déplacement», (la gamme de déplacement entre 0,01 et 0,03m).

ϵ la déformation à rupture en flexion (%),

s la flèche (mm).



Figure IV.14: test de l'éprouvette par le banc de flexion INSTRON 5890 2KN

IV.2.3.2.2.2. Caractérisation en flexion

Les Figure IV.15 et Figure IV.16 présentent la contrainte à rupture en flexion des plaques composites respectivement à base d'un et de deux plis. Les valeurs de la contrainte à rupture en flexion des plaques composites à base d'un seul pli de tissus 2D dépendent du type d'armure et plus précisément du nombre de points d'entrelacement des fils. Les plaques composites à base d'un seul pli de la structure satin 8 donnent la valeur la plus élevée de la contrainte à rupture en flexion des plaques composites à base d'un seul pli de tissus 2D. Cela est lié au faible nombre de points d'entrelacement des fils au sein de la structure satin 8 permettant de retenir la contrainte de flexion développée sur la surface des plaques composites [13],[19].

IV. Élaboration et caractérisation des matériaux composites à base des fibres de sisal

Les plaques composites réalisées à base des structures satin 4 et satin 8 présentent une résistance en flexion dans la direction trame plus élevée que celle dans la direction chaîne, cela est attribué à la densité des fils dans la direction trame plus élevée que celle dans la direction chaîne. En revanche, les plaques composites réalisées à base d'un seul pli des structures natté 2-2, croisé 2-2 et croisé 4-4 présentent une résistance en flexion dans la direction chaîne plus élevée que celle dans la direction trame.

La contrainte à rupture en flexion des plaques composites réalisées à base de deux plis de tissus 2D dépend de la fraction volumique des fibres. Les valeurs de la contrainte à rupture en flexion des plaques réalisées à base de deux plis de tissus 2D dans les deux directions chaîne et trame sont supérieures aux valeurs de celles des plaques composites à base d'un seul pli de tissus 2D. L'augmentation de nombre de plis de tissus 2D permet d'améliorer la contrainte à rupture en flexion des plaques composites à base de tissus 2D.

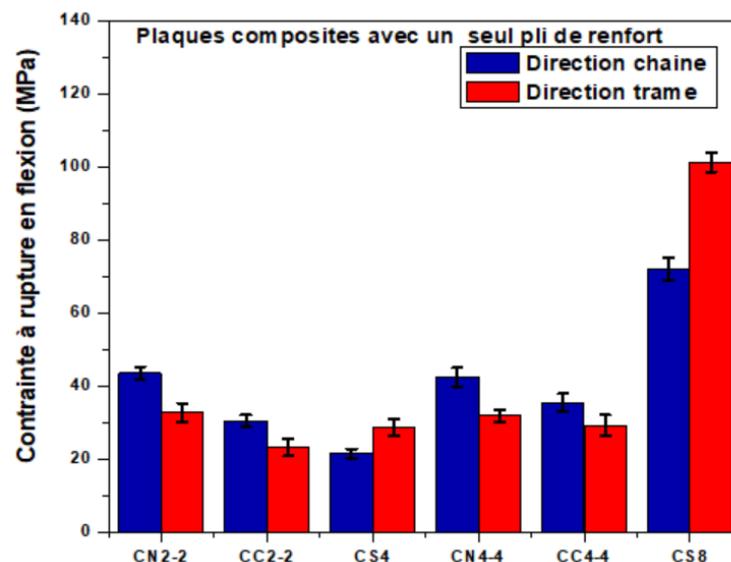


Figure IV.15: Contrainte à rupture en flexion des plaques composites à base d'un seul pli de tissus 2D

IV. Élaboration et caractérisation des matériaux composites à base des fibres de sisal

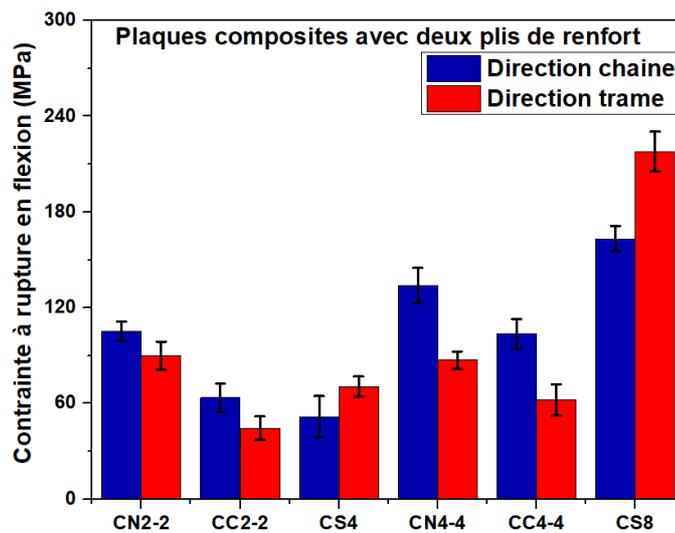


Figure IV.16: Contrainte à rupture en flexion des plaques composites à base de deux plis de tissus 2D

Les Figure IV.15 et Figure IV.16 donnent le module de flexion des plaques composites à base respectivement d'un et de deux plis de tissus 2D. Les valeurs du module de flexion des plaques composites à base d'un seul pli de tissu 2D dépend du type d'armure et plus précisément du nombre de points d'entrelacement des fils. Les plaques composites à base d'un seul pli et de deux plis de la structure satin 8 représente la valeur la plus élevée du module de flexion des plaques composites à base de tissus 2D. L'augmentation du nombre de plis de tissus 2D permet d'améliorer légèrement le module de flexion des plaques composites à base de tissus 2D.

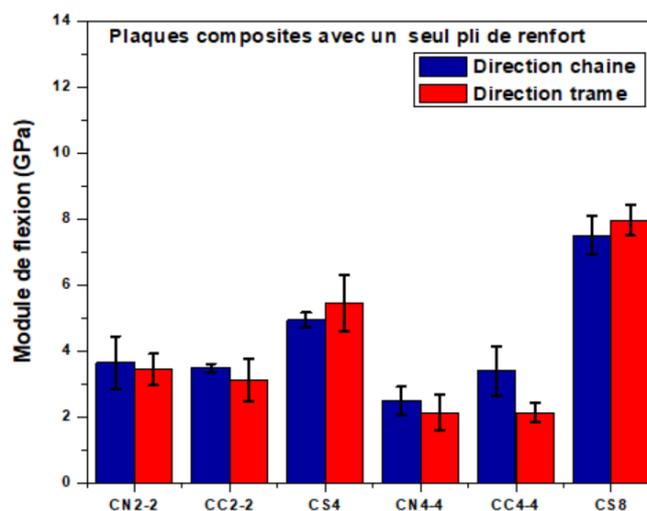


Figure IV.17: Module de flexion des plaques composites à base d'un seul pli de tissus 2D

IV. Élaboration et caractérisation des matériaux composites à base des fibres de sisal

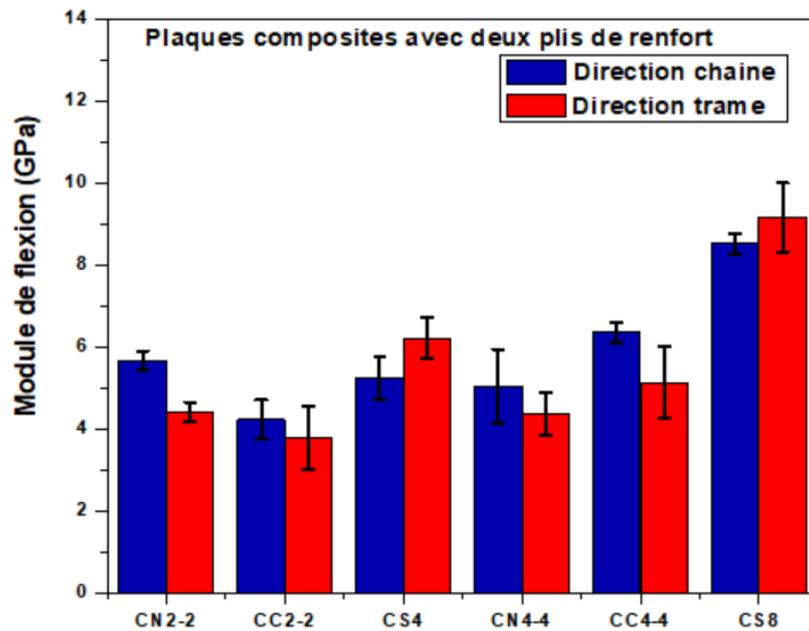


Figure IV.18: Module de flexion des plaques composites à base de deux plis de tissus 2D

La déformation à rupture en flexion est rapportée dans les Figure IV.19 et Figure IV.20 pour les plaques composites à base respectivement d'un seul et de deux plis de tissu 2D. Les valeurs de la déformation à rupture en flexion des plaques composites réalisées à base des structures tissées 2D sont similaires dans les deux directions chaîne et trame.

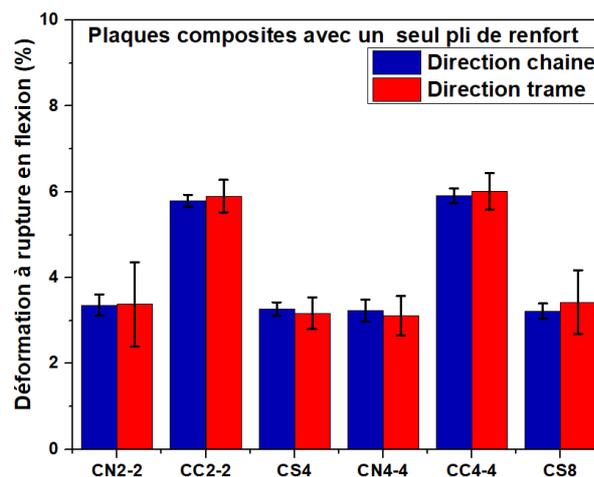


Figure IV.19: Déformation à rupture en flexion des plaques composites à base d'un seul pli de tissu 2D

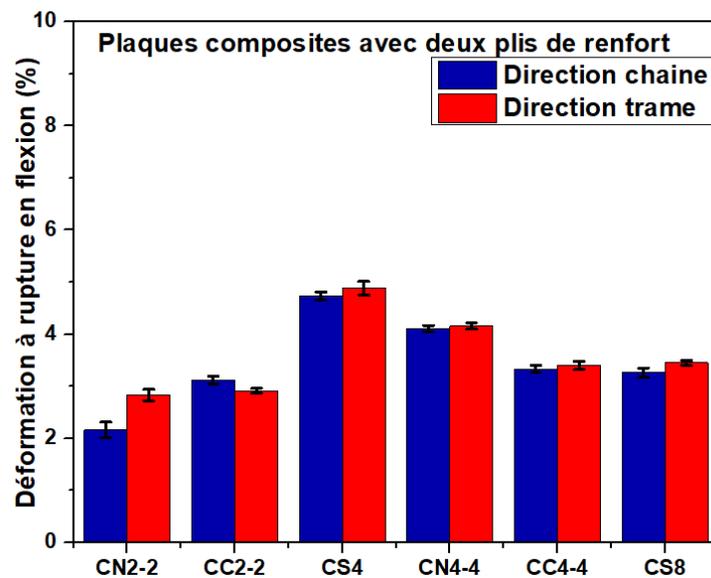


Figure IV.20 : Déformation à rupture en flexion des plaques composites à base de deux plis de tissus 2D

Afin de compléter l'évaluation de la performance mécanique des plaques composites réalisées à base de tissus 2D, les résultats obtenus de la caractérisation en flexion ont été comparés avec les propriétés en flexion de matériaux composites à base de structures tissées en fibres naturelles et de résine époxy, issues de la littérature. Cette comparaison montre que la contrainte à rupture en flexion des plaques composites à base d'un seul pli de tissu en fibre de sisal est élevée par rapport à celle des matériaux composites à base tissu toile en fibre de sisal d'origine indienne [196]. En revanche, cette contrainte à rupture en flexion est inférieure à celle des matériaux composites à base d'un seul pli de structure toile en fibre de bambou [206]. Le module en flexion des plaques composites réalisées à base des tissus 2D est supérieur à celui des matériaux composites à base de tissus en fibres naturelles (Tableau IV-7). La contrainte à rupture en flexion et le module en flexion des plaques composites à base de deux plis de tissus en fibre de sisal sont supérieurs aux valeurs de ces caractéristiques de matériaux composites à base de trois plis des structures tissées en fibre de kénaf (Tableau IV-7).

IV. Élaboration et caractérisation des matériaux composites à base des fibres de sisal

Tableau IV-7: Comparaison des propriétés de flexion des plaques composites à base d'un seul pli de tissus 2D en fibre de sisal avec celles des plaques composites à base de tissus 2D en fibres naturelles

Nombre de plis	Type de Renfort	Fraction Volumique des fibres (%)	Contrainte à rupture en flexion (MPa) (direction chaîne)	Module de flexion (GPa) (direction chaîne)	Référence
1	Sisal Toile	50	31,39	1,8	[196]
1	Bambou Toile	18	52,92	1,9	[206]
1	Bambou Croisé2-2	18	62,74	2,3	[206]
1	Jute Toile	22	48,42	2,8	[207]
1	Sisal Natté 2-2	21	43,39	5,67	Ces travaux de thèse
1	Sisal Croisé 2-2	18	30,38	3,48	
1	Sisal Satin 4	16	21,49	4,93	
1	Sisal Natté 4-4	25	42,36	2,49	
1	Sisal Croisé 4-4	29	35,46	6,34	
1	Sisal Satin 8	25	71,86	8,52	

Tableau IV-8: Comparaison des propriétés de flexion des plaques composites à base de deux plis de tissus 2D en fibre de sisal avec celles des plaques composites à base de tissus 2D en fibres naturelles

Nombre de plis	Type de Renfort	Fraction Volumique des fibres (%)	Contrainte à rupture en flexion (MPa) (direction chaîne)	Module de flexion (GPa) (direction chaîne)	Référence
3	Kénaif Toile	30	120	7,5	[212]
3	Jute Toile	20	43,65	4,5	[209]
2	Bambou Croisé2-2	18	37,83	0,9	[206]
2	Jute Toile	22	29,65	1,5	[207]
2	Chanvre Toile	20	26,3	0,89	[208]
2	Sisal Natté 2-2	35,18	105,33	3,43	Ces travaux de thèse
2	Sisal Croisé 2-2	24,14	63,55	3,78	
2	Sisal Satin 4	24,66	51,64	6,21	
2	Sisal Natté 4-4	37,94	134,02	4,35	
2	Sisal Croisé 4-4	35,8	103,66	2,13	
2	Sisal Satin 8	40,67	163,1	7,96	

IV. Élaboration et caractérisation des matériaux composites à base des fibres de sisal

IV.2.3.2.3. Propriétés à l'impact Charpy

IV.2.3.2.3.1. Présentation de l'essai d'impact Charpy

L'essai d'impact Charpy a été effectué selon la norme NF ISO 179[213] en utilisant un mouton-pendule motorisé INSTRON CEAST 9050 (Figure IV.21). Les éprouvettes testées ont été déposées horizontalement sur deux appuis distants de 62mm. Le principe de base de cet essai consiste à générer un choc brutal sur l'éprouvette afin de mesurer l'énergie absorbée par l'éprouvette lors de la rupture à l'impact. L'énergie initiale d'impact du pendule est de 25 J. L'énergie de surface absorbée par l'éprouvette est déterminée avec précision en fonction du mouvement du bras de pendule selon l'équation (IV.10). Cinq éprouvettes de chaque type de plaques composites réalisées ont été testées dans les deux directions chaîne et trame.

$$E = m \times g \times L(1 - \cos \alpha) \quad (\text{IV.10})$$

Avec :

E l'énergie absorbée par l'éprouvette (J/m²),

m la masse de l'éprouvette (g),

L la longueur du marteau (m),

g l'accélération de la pesanteur (9,8 m/s²),

α l'angle atteint par le mouvement du bras de pendule après l'impact.



Figure IV.21: Mouton-pendule motorisé INSTRON CEAST 9050

IV.2.3.2.3.2. Caractérisation à l'impact Charpy

L'énergie absorbée à rupture est présentée dans les Figure IV.22 et Figure IV.23 pour les plaques composites à base respectivement d'un et de deux plis de tissus 2D. Les valeurs obtenues de l'énergie absorbée des plaques composites réalisées à base d'un seul pli de tissus 2D montrent que les plaques composites réalisées à base des tissus ayant les densités de fils les plus élevées, groupe B (natté 4-4, croisé 4-4, satin 8) présentent une énergie absorbée à rupture plus élevée que celle des plaques composites à base des structures les moins denses (natté 2-2, croisé 2-2, satin 4). La différence de la valeur de l'énergie absorbée à rupture des plaques composites dans les directions chaîne et trame est liée à la densité des fils au sein des structures tissées 2D. L'augmentation du nombre de plis contribue à l'augmentation de l'énergie absorbée à rupture des plaques composites à base des structures tissées 2D.

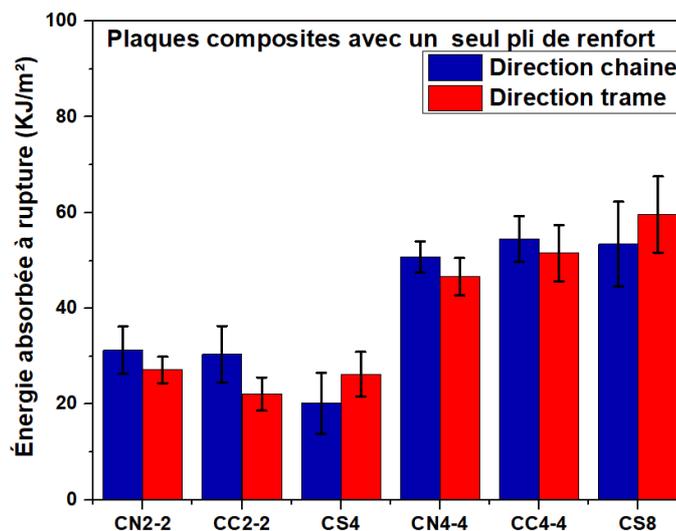


Figure IV.22: L'énergie absorbée à rupture des plaques composites à base d'un seul pli de tissus 2D

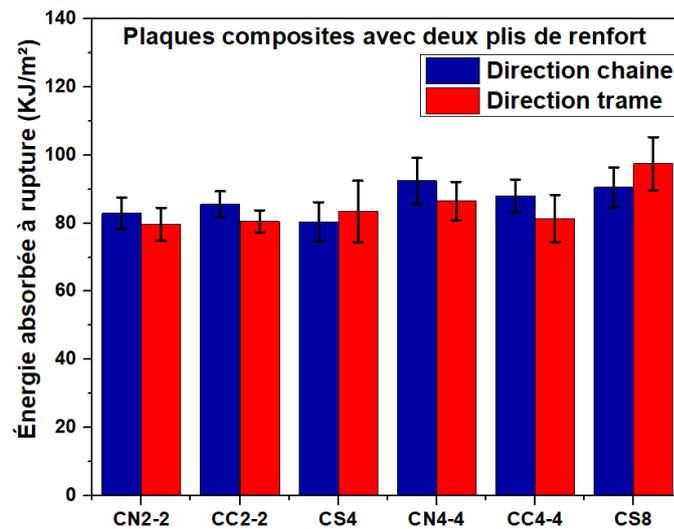


Figure IV.23: L'énergie absorbée à rupture des plaques composites à base de deux plis de tissus 2D

Les résultats obtenus des propriétés d'impact Charpy des plaques composites réalisées à base de tissus 2D en fibre de sisal ont été comparés avec ceux de matériaux composites à base de structures tissées en fibres naturelles et de résine époxy extraits de la littérature (Tableau IV-9). L'étude comparative montre que l'énergie absorbée à rupture des matériaux composites à base d'un seul pli de tissus 2D en fibre de jute et de chanvre est similaire à celle obtenue des matériaux composites à base d'un seul pli de tissus 2D en fibre de sisal. En revanche, pour ces plaques à base d'un pli les propriétés d'impact Charpy obtenues sont meilleures que celles des plaques composites réalisées à base d'un seul pli de tissus 2D en fibres de coco et de banane. La différence remarquée entre les résultats des propriétés d'impact Charpy des plaques composites réalisées à base de deux plis de tissus 2D et les résultats observés des matériaux composites à base de deux et trois plis de tissus 2D en fibres naturelles (fibre de lin, fibre de kénaf et fibre de jute) est liée à la différence de la fraction volumique de fibres (Tableau IV-10).

IV. Élaboration et caractérisation des matériaux composites à base des fibres de sisal

Tableau IV-9: Comparaison des propriétés d'impact Charpy des plaques composites à base d'un seul pli de tissus 2D en fibre de sisal avec celles des matériaux composites à base d'un seul pli de tissus 2D en fibres naturelles

Nombre de plis	Type de Renfort	Fraction Volumique des fibres (%)	Énergie absorbée à rupture (KJ/m ²) (direction chaîne)	Référence
1	Jute Toile	31,26	25	[214]
1	Chanvre Toile	20,40	36	[215]
1	Banane Toile	8,7	21	[216]
1	Coco Toile	12,98	23	[217]
1	Sisal Natté 2-2	21	31,26	Ces travaux de thèse
1	Sisal Croisé 2-2	18	30,38	
1	Sisal Satin 4	16	20,18	
1	Sisal Natté 4-4	25	50,71	
1	Sisal Croisé 4-4	29	54,47	
1	Sisal Satin 8	25	53,42	

Tableau IV-10: Comparaison des propriétés d'impact Charpy des plaques composites à base de deux plis de tissus 2D en fibre de sisal avec celles des matériaux composites à base de deux et trois plis de tissus 2D en fibres naturelles

Nombre de plis	Type de Renfort	Fraction Volumique des fibres (%)	Énergie absorbée à rupture (KJ/m ²) (direction chaîne)	Référence
2	Lin Toile	35,18±6,52	35,72	[218]
3	Kénaf Toile	30	31,8	[219]
3	Jute Toile	28	21,1	[219]
2	Sisal Natté 2-2	35,18	82,86	Ces travaux de thèse
2	Sisal Croisé 2-2	24,14	85,53	
2	Sisal Satin 4	24,66	80,41	
2	Sisal Natté 4-4	37,94	92,42	
2	Sisal Croisé 4-4	35,8	87,98	
2	Sisal Satin 8	40,67	90,53	

IV. Élaboration et caractérisation des matériaux composites à base des fibres de sisal

IV.2.3.2.4. Conclusion

Pour conclure sur l'analyse des propriétés mécaniques des plaques composites à base des structures tissée 2D en fils de sisal, les propriétés en traction, flexion et les propriétés d'impact des plaques composites à base des structures tissées 2D dépendent du nombre de plis, de la densité des fils et de l'architecture des structures tissées 2D.

IV.3. Mise en œuvre des matériaux composites à base des structures tissées 3D interlocks chaines

IV.3.1. Matériau utilisé

Après l'étude du potentiel de renforcement des matériaux composites par les structures tissées 2D à base de fils de sisal, les structures tissées 3D interlocks chaines ont été ainsi évaluées pour le renforcement des matériaux composites. Les quatre architectures choisies (Figure IV.24) représentent les quatre principales familles des structures tissées 3D interlocks chaines. Ce choix permet d'étudier l'influence du mode d'insertion des fils de chaîne de liage à travers l'épaisseur de ces structures sur les propriétés des matériaux composites à base de ces renforts. La matrice utilisée a été une résine époxy SR8200 associée à son durcisseur SD7204 fourni par SICOMIN. Les caractéristiques de la matrice ont été données à la section IV.2.1.

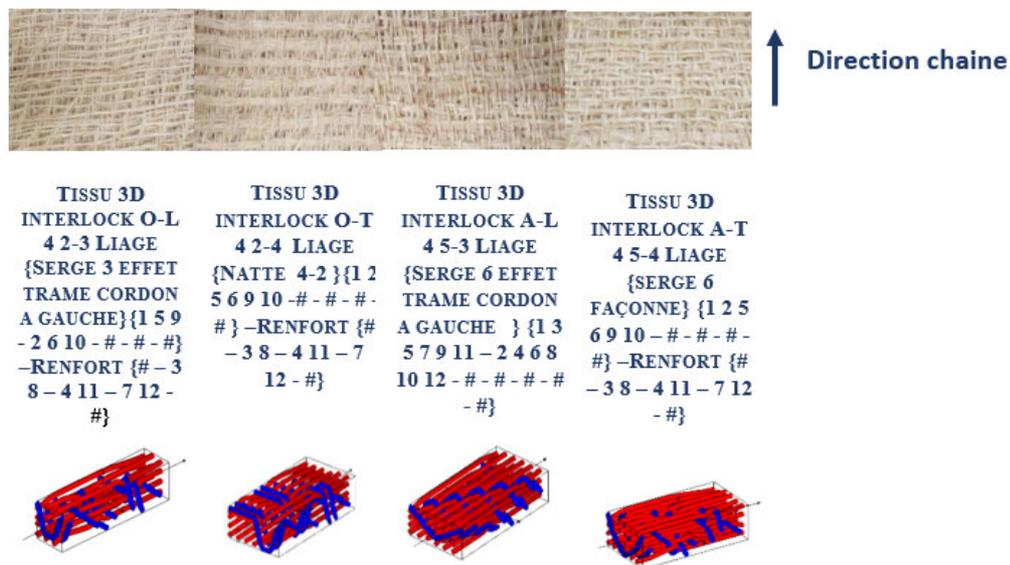


Figure IV.24: Structures tissées 3D interlocks chaines utilisées pour le renforcement des matériaux composites

IV. Élaboration et caractérisation des matériaux composites à base des fibres de sisal

IV.3.2. Procédé d'élaboration par Infusion sous vide

Le procédé d'élaboration des matériaux composites à base des structures tissées 3D interlocks chaines est similaire à celui utilisé pour les matériaux composites à base des structures tissées 2D (procédé d'infusion sous vide). Les étapes suivies pour l'élaboration des matériaux composites et la modification ajoutée sur le montage du procédé d'élaboration sont identiques à celles décrites pour l'élaboration des matériaux composites à base des structures tissées 2D (évoqué à la section IV.2.2), (Figure IV.25). Les matériaux composites réalisés ont été fabriqués à base d'un seul pli des structures tissées 3D interlocks chaines.



Figure IV.25: Montage utilisé du procédé d'infusion sous vide des matériaux composites à base des structures tissées 3D interlocks chaines

IV.3.3. Caractérisation des matériaux composites à base des structures tissées 3D interlocks chaines

La caractérisation des plaques composites a été effectuée selon les normes. Les éprouvettes de caractérisation ont été découpées avec une scie circulaire et conditionnées dans une atmosphère contrôlée (20°C, 61%). La désignation des plaques composites à base des structures tissées 3D interlocks chaines est donnée dans le Tableau IV-11.

Tableau IV-11: Désignation des plaques composites à base des structures tissées 3D interlocks chaines

Plaques Composites	Architectures des renforts
COL4 2-3	TISSU 3D INTERLOCK O-L 4 2-3 LIAGE {SERGE 3 EFFET TRAME CORDON A GAUCHE}{1 5 9 - 2 6 10 - # - # - #} - RENFORT {# - 3 8 - 4 11 - 7 12 - #}
COT4 2-4	TISSU 3D INTERLOCK O-T 4 2-4 LIAGE {NATTE 4-2}{1 2 5 6 9 10 - # - # - # - #} - RENFORT {# - 3 8 - 4 11 - 7 12 - #}
CAL 4 5-3	TISSU 3D INTERLOCK A-L 4 5-3 LIAGE {SERGE 6 EFFET TRAME CORDON A

IV. Élaboration et caractérisation des matériaux composites à base des fibres de sisal

GAUCHE} {1 3 5 7 9 11 – 2 4 6 8 10 12 - # - # - # - #}

CAT4 5-4 TISSU 3D INTERLOCK A-T 4 5-4 LIAGE {SERGE 6 FAÇONNE} {1 2 5 6 9 10 – # - # - # - #}
- #} – RENFORT {# – 3 8 – 4 11 – 7 12 - #}

IV.3.3.1. Propriétés physiques

Les propriétés physiques permettent de définir l'épaisseur, la densité, les fractions volumiques de fibres et de porosités des matériaux composites.

IV.3.3.1.1. Épaisseur

L'épaisseur des plaques composites a été mesurée à l'aide d'un pied à coulisse. La valeur moyenne et l'écart-type ont été calculés à partir des mesures de l'épaisseur en 10 points sur la surface des éprouvettes.

La Figure IV.26 donne les valeurs de l'épaisseur des plaques composites à base des structures tissées 3D interlocks chaines. L'épaisseur des plaques composites est inférieure à celle du renfort tissé sec, ce qui est attribué au procédé d'élaboration d'infusion sous vide. Le vide créé lors de la fabrication des plaques composites permet de compacter les structures tissées 3D interlocks chaines.

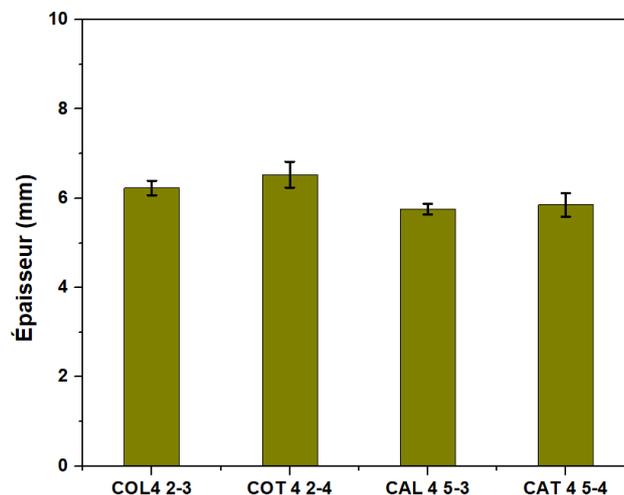


Figure IV.26: Épaisseur des plaques composites à base des structures tissées 3D interlocks chaines

IV.3.3.1.2. Fractions volumiques de fibres et de porosités

Les fractions volumiques de fibres et de porosités sont les caractéristiques principales étudiées pour déterminer la proportion en volume des différents composants du matériau

IV. Élaboration et caractérisation des matériaux composites à base des fibres de sisal

composite. La fraction volumique des fibres a été calculée selon l'équation (IV.2). Le taux de porosité représente la fraction du vide dans les plaques composites. Cette caractéristique a été calculée selon l'équation (IV.3).

Le Tableau IV-12 donne les valeurs de ces fractions volumiques des plaques composites réalisées. Le renforcement de la résine époxy par les structures tissées 3D interlocks chaines offre un gain en masse des plaques composites réalisées. La variation de la fraction volumique de fibres des plaques composites dépend de la masse surfacique des structures tissées 3D interlock chaine. La structure tissée O T 4 2-4 liage natté 4-2 représente la structure la plus dense en masse surfacique par rapport aux autres structures tissées 3D interlocks chaines (Figure III.22), ce qui implique une fraction volumique de fibre plus élevée dans la plaque composite associée (COT4-2-4). Le taux de porosité des plaques composites est compris entre 3 à 5 %.

Tableau IV-12: Fractions volumiques des fibres et de porosités des matériaux composites à base des structures tissées 3D interlocks chaines

Architectures du renfort	Fraction volumique de la résine(%)	Fraction volumique des fibres(%)	Fraction volumique de la porosité(%)
O L 4 2-3 liage sergé 3	60,26±3,75	35,36±4,29	4,38±1,27
O T 4 2-4 liage natté 4-2	49,65±5,86	41,23±6,63	4,56±0,98
A L 4 5-3 liage sergé 6	57,52±3,19	38,59±5,19	3,89±0,27
A T 4 5-4 liage sergé 6	56,93±8,64	37,68±4,28	5,39±0,47

IV.3.3.1.3. Densité

La densité des plaques composites dépend de la densité des fibres et de la résine. Cette caractéristique a été calculée selon l'équation (IV.4).

Le Tableau IV-13 présente la densité des plaques composites réalisées à base des structures tissées 3D interlock chaines. Les valeurs de la densité dépendent de la fraction volumique et de la densité des composants des plaques composites (fibre et résine). Les valeurs obtenues de la densité des plaques composites sont cohérentes avec les valeurs de la masse surfacique des structures tissées 3D interlocks chaines (Figure III.22). La densité des plaques réalisées est

faible par rapport à celle des matériaux composites à base des fibres synthétiques [220].

Tableau IV-13: Densité des plaques composites à base des structures tissées 3D interlocks chaines

Plaques Composites	Architectures du renfort	Densité (g/cm ³)
COL4 2-3	O L 4 2-3 liage sergé 3	1,28±0,04
COT4 2-4	O T 4 2-4 liage natté 4-2	1,4±0,06
CAL 4 5-3	A L 4 5-3 liage sergé 6	1,32±0,05
CAT4 5-4	A T 4 5-4 liage sergé 6	1,26±0,04

IV.3.3.1.4. Taux de reprise d'humidité

Comme indiqué à la section II.2.3.3 du chapitre II, la nature hydrophile de la fibre de sisal conduit à étudier la reprise d'humidité des plaques composites à base des structures tissées 3D interlocks chaines. La capacité de reprise d'humidité des plaques composites a été déterminée à l'aide de la méthode gravimétrique et de l'équation (IV.5). Les éprouvettes ont été conditionnées dans une atmosphère contrôlée (21°C, 61%).

Le comportement diffusif de l'humidité au sein des plaques composites réalisées a été analysé selon la loi de Fick. Les paramètres décrivant le mode de diffusion des molécules d'eau au sein des plaques composites ont été déterminés selon les équations (II.5), (II.6) et (IV.6).

La Figure IV.27 illustre l'allure de la courbe « teneur en humidité – temps » des plaques composites à base des structures tissées 3D interlocks chaines. Les phases d'absorption de l'humidité par les plaques composites réalisées sont similaires à celles observées lors de l'analyse du comportement diffusif de l'humidité de la fibre de sisal (évoqué au chapitre II à la section II.2.3.3). Les plaques composites à base de la structure tissée O T 4 2-4 liage natté 4-2 présentent plus de sensibilité à l'humidité que les autres plaques composites réalisées à base des structures tissées 3D interlocks chaines. Cette sensibilité est liée à la valeur élevée de la fraction volumique des fibres des plaques composites à base de la structure O T 4 2-4 liage natté 4-2 par rapport aux autres plaques composites. La teneur en humidité fibres des plaques composites à base de la structure O T 4 2-4 liage natté 4-2 est de 6,28%.

IV. Élaboration et caractérisation des matériaux composites à base des fibres de sisal

Le Tableau IV-14 donne les valeurs des paramètres de diffusion d'eau au sein des plaques composites à base des structures tissées 3D interlocks chaines. La vitesse de diffusion des molécules d'eau est élevée en présence d'une fraction volumique des fibres importante dans les plaques composites à base des structures tissées 3D interlocks chaines. Le comportement diffusif de l'humidité au sein des plaques composites à base des structures tissées 3D interlocks chaines est cohérent avec le comportement diffusif de l'humidité analysée dans la littérature pour les matériaux composites à base des fibres naturelles [204], [205].

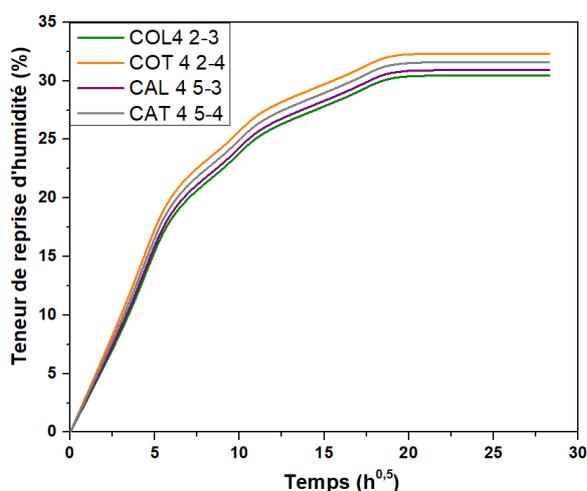


Figure IV.27: Taux de reprise d'humidité des plaques composites à base des structures tissées 3D interlocks chaines

Tableau IV-14: Coefficient Paramètres de diffusion de l'absorption de l'humidité des plaques composites

Plaques Composites	Architectures du renfort	Coefficient de diffusion S (*10 ⁻⁷ mm ² /s)	Coefficient de perméabilité P (*10 ⁻⁷ mm ² /s)
COL4 2-3	O L 4 2-3 liage sergé 3	2,25±0,17	2,98±0,2
COT4 2-4	O T 4 2-4 liage natté 4-2	3,76±0,11	2,74±0,17
CAL 4 5-3	A L 4 5-3 liage sergé 6	2,39±0,13	2,5± 0,12
CAT4 5-4	A T 4 5-4 liage sergé 6	2,47±0,10	3,12±0,36

IV. Élaboration et caractérisation des matériaux composites à base des fibres de sisal

IV.3.3.1.5. Conclusion

Pour conclure sur les propriétés physiques des plaques composites réalisées à base des structures tissées 3D interlocks chaines, l'épaisseur des plaques composites à base des structures tissées 3D interlocks chaines est inférieure à celle des structures tissées 3D interlocks chaines à l'état sec, ce qui est liée au procédé d'infusion sous vide. La fraction volumique des fibres au sein des plaques composites à base des structures tissées 3D interlocks chaines dépend clairement de la masse surfacique des structures tissées 3D interlocks chaines. Le comportement diffusif de l'humidité des plaques composites réalisées à base des structures tissées 3D interlocks chaines dépend principalement de la fraction volumique des fibres.

IV.3.3.2. Propriétés mécaniques

L'analyse des propriétés mécaniques des plaques composites à base des structures tissées 3D interlocks chaines consiste à étudier le comportement des plaques composites sous différentes sollicitations mécaniques (traction, flexion, impact).

IV.3.3.2.1. Propriétés mécaniques en traction

IV.3.3.2.1.1. Présentation de l'essai de traction

Les propriétés de traction des plaques composites réalisées à base des structures tissées 3D interlocks chaines ont été analysées selon la norme NF ISO 527-4[167] en utilisant le banc de traction INSTRON 5980 250 KN. Les paramètres de l'essai de traction sont similaires à ceux utilisés pour les plaques composites à base de tissus 2D (indiqué à la section IV.2.3.2.1.1). Cinq éprouvettes de chaque type de plaques composites ont été testées dans les deux directions chaîne et trame.

IV.3.3.2.1.2. Caractérisation en traction

La Figure IV.28 donne les valeurs de la contrainte à rupture en traction des plaques composites à base des structures tissées 3D interlocks chaines. La valeur la plus élevée de la contrainte à rupture en traction des plaques composites, dans les deux directions chaîne et trame, concerne la plaque à base de la structure O T 4 2-4 liage natté 4-2, qui dispose de la fraction volumique de fibres la plus élevée. Ces performances sont liées aux propriétés supérieures en traction (effort maximal) de la structure O T 4 2-4 liage natté 4-2 avant imprégnation par rapport

IV. Élaboration et caractérisation des matériaux composites à base des fibres de sisal

aux autres structures 3D interlocks chaines et au faible taux de porosités. La faible valeur de la contrainte à rupture en traction correspond à la plaque composite à base de la structure A L 4 5-3 liage sergé 6 effet trame, qui ne dispose pas de fils de chaîne de renfort. Les valeurs de la contrainte à rupture en traction des plaques composites à base des structures tissées 3D interlocks chaines peuvent être comparées avec celles des plaques composites à base de deux plis de structures tissées 2D (section IV.2.3.2.1.2), car la fraction volumique des plaques composites à base de deux plis de structures tissées 2D est similaire à celle des plaques composites à base des structures tissées 3D interlocks chaines. Les plaques composites à base des structures tissées 3D interlocks chaines présentent une contrainte à rupture en traction plus élevée de 23,67 à 45,55 % par rapport à celle des plaques composites à base de deux plis de structures tissées 2D.

La Figure IV.29 présente le module de traction des plaques composites à base des structures tissées 3D interlocks chaines. Les faibles valeurs du module de traction sont cohérentes avec le module de traction des plaques composites à base des structures tissées 3D interlocks chaines en fibre de lin [221]. Les valeurs du module de traction des plaques composites à base des structures tissées 3D interlocks chaines sont inférieures à celles des plaques composites à base de structures tissées 2D.

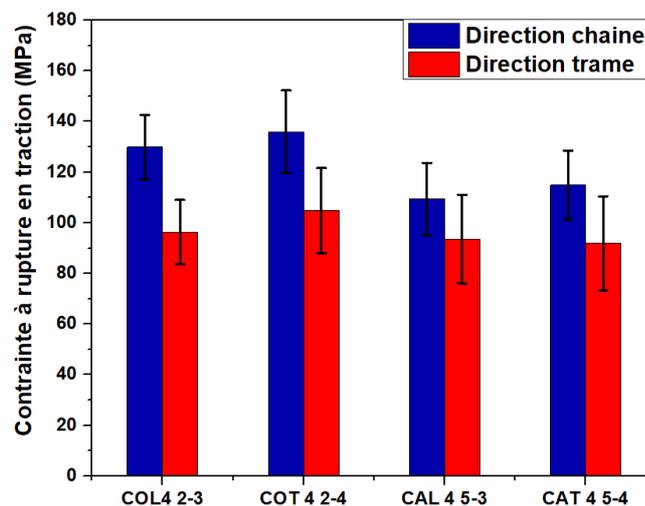


Figure IV.28: Contrainte à rupture en traction des plaques composites à base des structures tissées 3D interlocks chaines

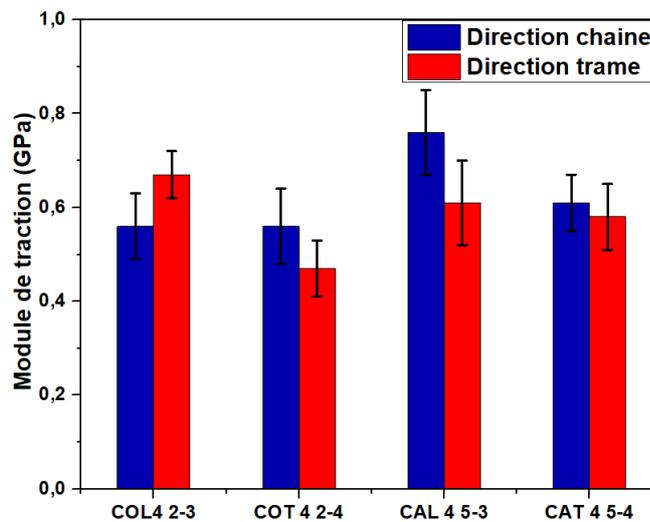


Figure IV.29: Module de traction des plaques composites à base des structures tissées 3D interlocks chaines

La déformation à rupture en traction des plaques composites à base des structures tissées 3D interlocks chaines est représentée dans la Figure IV.30. Les valeurs de la déformation à rupture en traction dans les deux directions chaîne et trame dépend de l'embuvage et du retrait des fils au sein des structures tissées 3D interlocks chaines. Les valeurs de la déformation à rupture en traction des plaques composites à base des structures tissées 3D interlocks chaines est supérieure de 71 à 80 % par rapport à celles des plaques composites à base de deux plis de structures tissées 2D. Cette différence est due aux valeurs élevées de l'embuvage et au retrait des fils au sein des structures tissées 3D interlocks chaines par rapport à celles des structures tissées 2D (section III.2.3.1.2 et section III.3.3.1.2, chapitre III).

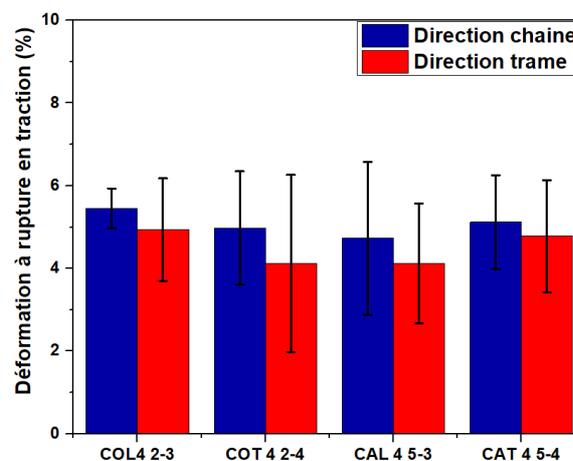


Figure IV.30: Déformation à rupture en traction des plaques composites à base des structures tissées 3D interlocks chaines

IV. Élaboration et caractérisation des matériaux composites à base des fibres de sisal

IV.3.3.2.2. Propriétés mécaniques en flexion

IV.3.3.2.2.1. Présentation de l'essai de flexion

Le comportement en flexion des plaques composites à base des structures tissées 3D interlocks chaines a été analysé selon la norme NF ISO 14125 [210]. L'essai de flexion a été basé sur l'essai de flexion en trois points. Le banc de flexion utilisé est le banc INSTRON 5890 avec une vitesse de 1mm/min. Cinq éprouvettes de chaque type de plaques composites réalisées ont été testées dans les deux directions chaîne et trame.

IV.3.3.2.2.2. Caractérisation en flexion

La contrainte à rupture en flexion des plaques composites réalisées à base des structures tissées 3D interlocks chaines est représentée dans la Figure IV.31. Les structures tissées 3D interlocks chaines avec une insertion à travers l'épaisseur ($X_2=T$) conduisent à une contrainte à rupture en flexion élevée par rapport aux structures tissées 3D interlocks chaines avec une insertion entre les couches, ce qui est lié à la rigidification des structures avec la liaison des fils à travers l'épaisseur [221].

Le module en flexion des plaques composites varie en fonction du type d'insertion des fils de liage à travers l'épaisseur (Figure IV.32). Le module en flexion suit la même tendance que la contrainte à rupture en flexion des plaques composites.

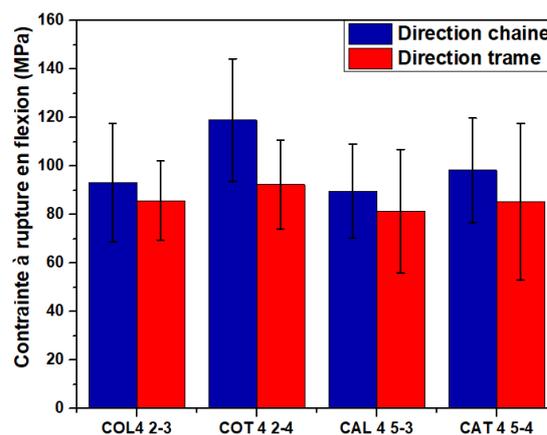


Figure IV.31: Contrainte à rupture en flexion des plaques composites à base des structures tissées 3D interlocks chaines

IV. Élaboration et caractérisation des matériaux composites à base des fibres de sisal

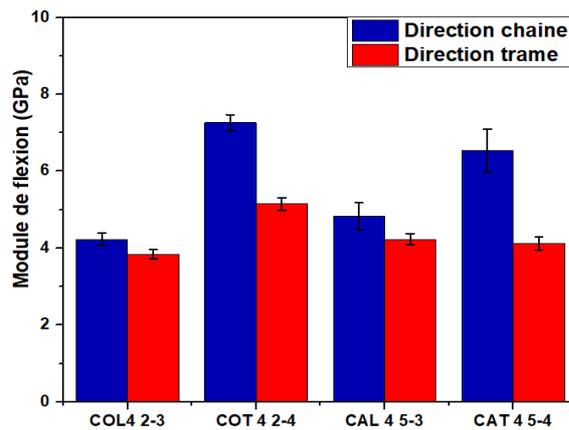


Figure IV.32: Module de flexion des plaques composites à base des structures tissées 3D interlocks chaines

La Figure IV.33 présente les valeurs de la déformation à rupture en flexion des plaques composites réalisées. Les valeurs de la déformation à rupture en flexion des plaques composites à base des structures tissées 3D interlocks chaines sont supérieures à celles des plaques composites à base de deux plis des structures tissées 2D.

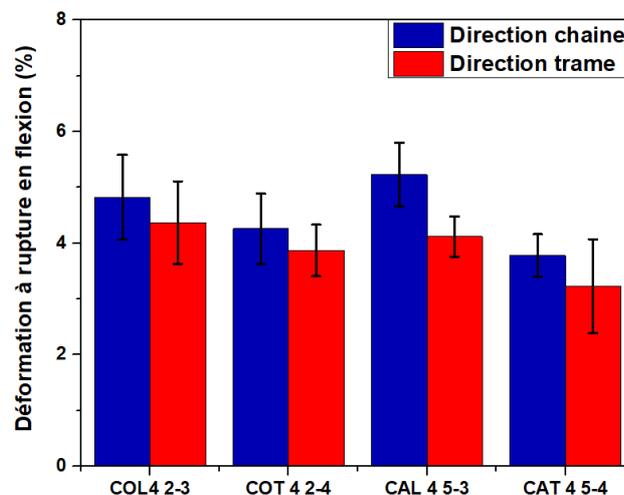


Figure IV.33: Déformation à rupture en flexion des plaques composites à base des structures tissées 3D interlocks chaines

IV.3.3.2.3. Propriétés d'impact Charpy

IV.3.3.2.3.1. Présentation de l'essai d'impact Charpy

Les propriétés d'impact Charpy des plaques composites réalisées à base des structures tissées 3D interlocks chaines ont été analysées selon la norme NF ISO 179[213] en utilisant un mouton-pendule motorisé INSTRON CEAST 9050. Le protocole expérimental de l'essai d'impact

IV. Élaboration et caractérisation des matériaux composites à base des fibres de sisal

Charpy est similaire au protocole suivi pour l'analyse des propriétés d'impact Charpy des plaques composites à base de tissus 2D (indiqué à la section IV.2.3.2.3.1). Cinq éprouvettes de chaque type de plaques composites réalisées ont été testées dans les deux directions chaîne et trame.

IV.3.3.2.3.2. Caractérisation à l'impact Charpy

La Figure IV.34 représente les valeurs de l'énergie à rupture des plaques composites réalisées à base des structures tissées 3D interlocks chaînes. Les structures tissées 3D interlocks chaînes avec une insertion des fils de liage à travers l'épaisseur ($X_2=T$) offrent une capacité élevée d'absorption d'énergie à rupture des plaques composites réalisées à base de ces structures par rapport à celle des plaques composites réalisées à base des structures tissées 3D interlocks chaînes avec une insertion des fils de chaîne de liage entre les couches ($X_2=L$). La différence observée des valeurs de l'énergie absorbée à rupture des plaques composites réalisées dans les deux directions chaîne et trame est liée à la variation du titrage des fils.

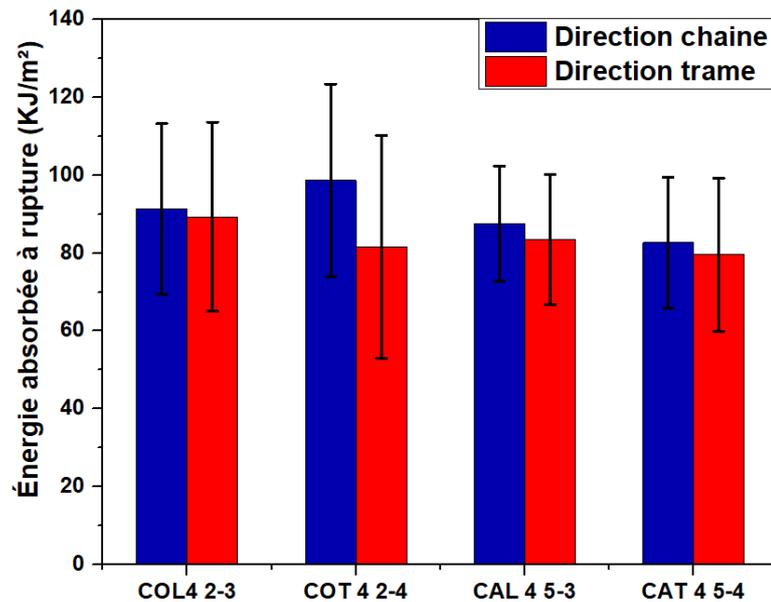


Figure IV.34: Énergie absorbée à rupture des plaques composites à base des structures tissées 3D interlocks chaînes

IV.3.3.2.4. Conclusion

Pour conclure sur l'analyse des propriétés mécaniques des plaques composites à base des structures tissée 3D interlocks chaînes en fils de sisal, les propriétés mécaniques (traction,

IV. Élaboration et caractérisation des matériaux composites à base des fibres de sisal

flexion et impact Charpy) des plaques composites dépendent du type de l'architecture, et plus précisément le mode d'insertion des fils de liage, de la fraction volumique des fibres et du taux de porosité. Les structures tissées 3D interlocks chaines avec une insertion des fils de liage à travers l'épaisseur offrent une meilleure rigidité en flexion et une meilleure énergie absorbée à rupture des plaques composites à base de ces structures.

IV.4. Conclusion

Dans ce chapitre, les structures tissées 2D et les structures tissées 3D interlocks chaines à base de fils de sisal précédemment développées ont été étudiées comme renforts de matériaux composites.

En premier lieu, les plaques composites ont été réalisées à base des structures tissées 2D. Le procédé d'élaboration des plaques composites a été le moulage d'infusion sous vide. Ce procédé a été modifié en ajoutant une plaque métallique avant la fermeture du moule afin d'assurer une surface lisse dans les deux faces des plaques composites. Deux campagnes de réalisation des plaques composites ont été effectuées, la première campagne relative au développement des plaques composites à base d'un seul pli des structures tissées 2D et la deuxième campagne relative au développement des plaques composites à base de deux plis des structures tissées 2D. Après la fabrication des plaques composites, les propriétés physiques et mécaniques des plaques composites à base des structures tissées 2D ont été analysées selon les normes. La première étape de caractérisation des plaques composites a permis de déterminer les propriétés physiques des plaques composites correspondant à l'épaisseur, la densité, la fraction volumique des fibres et le taux de reprise en humidité. L'épaisseur des plaques composites réalisées lors des deux campagnes est inférieure à l'épaisseur des structures tissées 2D, ce qui est lié à la compaction des structures tissées 2D lors de la fabrication des plaques composites. La fraction volumique des fibres des plaques composites réalisées de la première campagne est inférieure à celle des plaques composites réalisées de la deuxième campagne. Le taux de porosité des plaques composites à base des structures tissées 2D est compris entre 3 et 5%. La densité des plaques composites à base des structures tissées 2D dépend clairement de la fraction volumique des fibres. Le taux de reprise en humidité des plaques composites des structures tissées 2D a été mesuré selon la norme. La vitesse de diffusion des molécules d'eau est élevée en présence d'une fraction volumique des fibres élevée au sein des plaques composites à base des structures tissées 2D. Ensuite, les propriétés mécaniques des plaques composites à base des structures tissées 2D

IV. Élaboration et caractérisation des matériaux composites à base des fibres de sisal

ont été analysées sous les différentes sollicitations mécaniques (traction, flexion, impact Charpy). Les résultats obtenus de l'analyse des propriétés de traction ont montré que la contrainte à rupture en traction des plaques composites à base des structures tissées 2D est influencé clairement par la fraction volumique des fibres, le module de traction et la déformation à rupture en traction des plaques composites dépendant des ondulations des fils au sein des structures tissées 2D. Le comportement en traction des plaques composites à base des structures tissées 2D en fibre de sisal est meilleur que le comportement en traction des plaques composites à base de la structure toile en fibre de sisal d'origine indienne. Ensuite, les propriétés de flexion des plaques composites ont été étudiées en se basant sur le principe de l'essai de flexion en trois points. La contrainte à rupture en flexion et le module de flexion des plaques composites à base d'un seul et de deux plis des structures tissées 2D dépendent clairement de la densité des fils au sein des structures tissées 2D. La déformation à rupture en flexion des plaques composites à base des structures tissée 2D est similaire dans les deux directions chaîne et trame. Le comportement en flexion des plaques composites à base des structures tissées 2D en fibre de sisal est meilleur que le comportement en flexion des plaques composites à base des structures tissées 2D en fibre de kéraf. Ensuite, les propriétés d'impact ont été analysées selon le principe d'impact Charpy. L'énergie absorbée à rupture des plaques composites à base des structures tissées 2D dépend de la masse surfacique des structures tissées 2D.

En deuxième lieu, les plaques composites à base des structures tissées 3D interlocks chaînes ont été fabriquées par le moulage d'infusion sous vide. Quatre structures tissées 3D interlocks chaînes ont été choisies représentant les quatre principales familles des structures tissées 3D interlocks chaînes. Le procédé d'élaboration des plaques composites est similaire au procédé d'élaboration des plaques composites à base des structures tissées 2D. Après la fabrication des plaques composites, les propriétés physiques et mécaniques des plaques composites ont été analysées selon les normes. Les propriétés physiques des plaques composites à base des structures tissées 3D interlocks chaînes ont été analysées en déterminant l'épaisseur, la densité, la fraction volumique des fibres et le taux de reprise en humidité. L'épaisseur des plaques composites à base des structures tissées 3D interlocks chaînes est inférieure à l'épaisseur des structures tissées 3D interlocks chaînes. La fraction volumique des fibres des plaques composites dépend de la masse surfacique des structures tissées 3D interlocks chaînes. La teneur de reprise en humidité des plaques composites dépend clairement de la fraction volumique des fibres. Ensuite, les propriétés mécaniques des plaques composites ont été

IV. Élaboration et caractérisation des matériaux composites à base des fibres de sisal

analysées par le même protocole expérimental de la caractérisation mécanique des plaques composites à base des structures tissées 2D. Les résultats obtenus de la caractérisation en traction des plaques composites ont montré que la contrainte à rupture en traction des plaques composites réalisées dans les deux directions chaîne et trame dépend de la contrainte à rupture en traction des structures tissées 3D interlocks chaînes. Les valeurs de la déformation dans les deux directions chaîne et trame dépend de l'embuvage et du retrait des fils au sein des structures tissées 3D interlocks chaînes. Ensuite, l'analyse des propriétés de flexion a démontré que la contrainte à rupture en flexion varie dans les deux directions chaîne et trame en fonction du titrage des fils. Les structures tissées 3D interlocks chaînes avec une insertion à travers l'épaisseur ($X_2=T$) offrent une contrainte à rupture en flexion élevée des plaques composites respectives par rapport aux structures tissées 3D interlocks chaînes avec une insertion entre couches. Cela s'explique par la rigidification des structures avec la liaison des fils à travers l'épaisseur. Puis, l'étude des propriétés d'impact Charpy ont montré que les structures tissées 3D interlocks chaînes avec une insertion des fils de liage à travers l'épaisseur offrent une meilleure énergie absorbée à rupture des plaques composites à base de ces structures.

Les résultats obtenus de la mise en œuvre des matériaux composites à base des structures tissées 2D et des structures tissées 3D interlocks chaînes ont montré leur potentiel en tant que renfort à base de fils de sisal.

Conclusion générale

Le recours aux fibres naturelles pour le renforcement des matériaux composites présente une solution adaptée pour réduire l'impact environnemental des matériaux composites dans les différents domaines d'applications. Malgré la diversité biologique des ressources naturelles marocaines, ces ressources sont rarement utilisées pour le développement des matériaux composites. Généralement, les fibres naturelles d'origine marocaine sont utilisées seulement dans l'artisanat et la médecine traditionnelle. L'objectif des travaux présentés dans ce manuscrit consiste à développer des renforts tissés en fibres de sisal d'origine marocaine pour matériaux composites. Une démarche multi échelles a été appliquée avec une analyse du comportement aux échelles fibre, fil, tissu et composite afin de maîtriser chaque étape de la production, depuis la récolte de la fibre jusqu'au produit final. Ces travaux se sont décomposés en plusieurs étapes.

La première étape a consisté en l'étude des propriétés à l'échelle fibre. Les propriétés morphologiques ont été analysées en premier temps. La mesure de la longueur et du diamètre de la fibre utilisée a révélé la dispersion des valeurs de longueur et de diamètre de la fibre de sisal relativement à sa composition. Une comparaison de ces caractéristiques par rapport à celles de la fibre de sisal en provenance d'Inde et du Kenya a pu être établie. L'observation microscopique de la surface de la fibre de sisal a mis en évidence la présence des composants non cellulosiques (lignine, hémicellulose) sur la surface de la fibre de sisal. La mesure de la densité de la fibre de sisal a montré la similarité entre la valeur de la densité de la fibre d'origine marocaine ($1,45 \text{ g/cm}^3$) avec celle de la fibre de sisal brésilienne. Par la suite, une étude sur la sensibilité à l'eau de la fibre de sisal (capacité d'absorption de l'eau, taux de reprise en eau et mouillabilité) a été conduite. Le comportement de la fibre de sisal en présence d'eau a révélé un comportement moyennement hydrophile de 17,5% et 10,65% comparativement à la fibre d'alfa et la fibre de chanvre, respectivement. Une analyse de la composition chimique de la fibre de sisal à l'aide d'une spectroscopie infrarouge FTIR a permis d'identifier les différents composants de la fibre de sisal (hémicellulose, cellulose, lignine), ainsi que les pics hydroxyles et carboxyles responsables de la sensibilité à l'eau. Les propriétés en traction de la fibre de sisal ont été déterminées par deux méthodes de caractérisation (essai de traction unitaire et IFBT). Les résultats obtenus à l'aide de l'essai de traction unitaire de la fibre de sisal ont montré que la résistance à la traction de la fibre de sisal d'origine marocaine est supérieure respectivement de 16,5% et 19,5% par rapport à celle de la fibre de sisal d'origine indienne et mexicaine. Les

propriétés en traction de la fibre de sisal, en termes de modules d'élasticité, déterminées par l'essai IFBT, sont similaires à celles obtenues par l'essai de traction unitaire de la fibre en tenant compte de la porosité des éprouvettes imprégnés.

La deuxième étape a porté sur l'étude des propriétés à l'échelle fil. L'observation microscopique de la surface du fil de sisal a permis d'illustrer le désalignement des fibres à la surface lors de la torsion du fil. Les mesures du diamètre et du titre du fil de sisal ont révélé l'irrégularité des caractéristiques du fil de sisal, attribuée à la variabilité des propriétés morphologiques de la fibre de sisal et au procédé de filature. La tissabilité du fil de sisal repose fortement sur la torsion du fil. L'angle de torsion du fil de sisal a été mesuré (traitement des images microscopiques) et comparé avec deux modèles théoriques. Les résultats obtenus ont montré que l'angle de torsion calculé par les deux modèles théoriques ($M1 : 23,16^\circ$, $M2 : 24,16^\circ$) se positionne dans la plage de variation de celui mesuré expérimentalement ($23,14 \pm 2,75^\circ$). La ténacité du fil de sisal a été déterminée afin d'identifier les propriétés mécaniques en traction du fil avant le tissage.

La troisième étape s'est focalisée sur l'influence du procédé de tissage sur les propriétés du fil et de la fibre. Les résultats obtenus ont montré que le tissage des structures 2D entraîne la réduction de la ténacité des fils dans les directions chaîne et trame d'au moins de 5% et la rigidification des fibres de 4% par rapport aux propriétés avant tissage. Le tissage des structures 3D interlocks chaîne a conduit à la réduction de la ténacité des fils dans les directions chaîne et trame respectivement dans des intervalles de 9,3 à 16,1 % et de 6,47 à 13,53 %, à la rigidification des fibres de 8% et à la dégradation des fibres de 6% par rapport aux propriétés avant tissage pour les structures avec une insertion orthogonale des fils de chaîne de liage. Ces résultats ont mis en évidence les sollicitations appliquées sur les fils durant chaque étape du procédé de tissage, qui conduit à la détérioration de la performance mécanique du fil et de la fibre de sisal.

La quatrième étape a porté sur l'élaboration et la caractérisation des structures tissées 2D et 3D en fils de sisal. Six architectures de structures tissées 2D et 3D ont été conçues et fabriquées sur la même machine à tisser. Les mesures de la densité des fils, de l'épaisseur, de l'embuvage et du retrait des fils ont révélé l'influence du type d'armure sur ces propriétés structurelles. L'analyse des propriétés mécaniques (traction, flexion) des structures tissées 2D a permis d'identifier les structures tissées 2D les plus performantes. La meilleure résistance en traction des structures tissées 2D est obtenue pour l'armure nattée 2-2 pour les structures tissées les

moins denses et pour l'armure satin 8 pour les structures tissées les plus denses. Les résultats en flexion ont montré que la densité des fils est un facteur important influençant la rigidité en flexion. Les mesures de l'embuvage des fils et de l'épaisseur des structures tissées 3D interlocks chaines ont montré que les structures tissées 3D interlocks chaîne avec une insertion orthogonale des fils de chaîne de liage conduisent à une valeur élevée de l'embuvage des fils de chaîne de liage et les structures tissées 3D interlocks chaîne avec une insertion angulaire des fils de chaîne de liage donne une valeur élevée de l'embuvage des fils de chaîne de liage. L'analyse des propriétés mécaniques des structures 3D interlocks chaines a révélé que la structure O-T 4 2-4 Liage Natté 4-2 donne la meilleure résistance en traction et la meilleure rigidité en flexion par rapport aux autres architectures.

La dernière étape a permis d'élaborer et caractériser les plaques composites renforcées des structures tissées 2D et 3D à base de fils de sisal avec une résine époxy. Le procédé d'infusion sous vide a été utilisé pour la fabrication des différents matériaux composites. En premier temps, les propriétés physiques et mécaniques de plaques composites à base des structures tissées 2D ont été étudiées en fonction du nombre de plis. Les résultats obtenus sur la fraction volumique des fibres ont révélé que le passage à deux plis des structures tissées 2D augmente la fraction volumique des fibres de 36% à 41,8%. Par la suite, l'étude des propriétés en traction et d'impact Charpy a montré que les plaques composites à base d'un et deux plis de tissus 2D avec une fraction volumique des fibres élevée contribue à une meilleure résistance en traction et à l'impact (type Charpy). Les plaques composites à base d'un seul pli des structures tissées (croisé 2-2, satin 4, croisé 4-4) ont montré un comportement en traction équilibré dans les deux directions chaîne et trame. Les résultats obtenus lors de l'analyse du comportement en flexion ont montré que les plaques composites à base d'un et de deux plis de la structure tissée satin 8 ont une meilleure résistance en flexion en comparaison avec les autres plaques. Ensuite, les propriétés mécaniques des plaques composites à base des structures tissées 2D ont été comparées avec celles de matériaux composites à base des structures tissées 2D non imprégnées en fibres naturelles. Les plaques composites renforcés des structures tissées 2D en fibre de sisal d'origine marocaine ont un comportement mécanique plus performant que les plaques composites renforcés des structures tissées 2D en fibre de sisal d'origine indienne et en fibre de banane. Les propriétés physiques et mécaniques des plaques composites à base des tissus 3D interlocks chaîne ont été analysées en fonction du type d'architecture. Les propriétés en flexion et en impact Charpy des plaques composites à base des structures tissées 3D interlocks chaines ont permis de montrer que l'insertion des fils de chaîne de liage à travers l'épaisseur contribue

à une meilleure résistance en flexion et au choc Charpy. Enfin, La caractérisation des plaques composites à base des structures tissées 2D et 3D a permis de mettre en évidence la performance mécanique élevée des plaques composites à base des structures tissées 3D par rapport à celle des plaques composites à base de deux plis des structures tissées 2D.

Perspectives

L'approche multi-échelle apportée dans ces travaux de thèse permet d'envisager des perspectives à chacune des échelles étudiées (fibre, fil, tissu, composite).

À l'échelle de la fibre, l'identification des propriétés de la fibre de sisal située au nord du Maroc a permis de montrer le potentiel textile de la fibre de sisal d'origine marocaine. De ce fait, il sera intéressant d'évaluer la performance de la fibre de sisal extraite des différentes régions du Maroc (région du sud...). En plus, un traitement chimique de la fibre de sisal pourra être effectué pour réduire les composants non cellulosiques de la fibre responsables de la sensibilité à l'eau et préserver la performance mécanique de la fibre de sisal.

À l'échelle du fil, le fil utilisé était un fil retordu dans le sens Z. Une optimisation de l'angle de torsion et du titre du fil de sisal pourra être envisagée pour mieux comprendre les limites et les propriétés du fil de sisal.

À l'échelle du tissu, les propriétés des structures tissées 2D en fils de sisal ont montré l'influence du type d'architecture et la densité des fils sur ces propriétés. Il serait intéressant de faire varier la densité des fils dans la direction chaîne lors de la fabrication des structures tissées 2D afin d'identifier les limites optimales de la fabrication des structures tissées 2D à partir d'un titrage de fil de sisal donné. Les structures tissées 3D interlocks chaînes ont été fabriquées sur la base des principales familles des structures tissées 3D interlocks chaînes avec un nombre de couches constant. Il sera nécessaire d'étudier l'influence de la variation du nombre de couches sur les propriétés structurelles et mécaniques de ces structures.

À l'échelle du composite, afin de compléter l'analyse du comportement des plaques composites réalisées à base des structures tissées 2D et 3D en fils de sisal, une étude des propriétés diélectriques sera à envisager afin d'analyser l'interaction entre la fibre de sisal et la résine époxy. Une étude diélectrique sera basée sur le principe de la spectrométrie diélectrique afin de déterminer les propriétés diélectriques en fonction de la fréquence. La mesure diélectrique permettra de déterminer les valeurs de la permittivité complexe, de la permittivité réelle, du facteur de perte, de la tangente de l'angle de perte diélectrique et à leurs variations en fonction de la fréquence. Les variations de la permittivité seront justifiées par des phénomènes de relaxation. La relaxation interfaciale sera identifiée à des fréquences spécifiques en fonction des parties isolantes et conductrices des plaques composites, ainsi que le type de renfort.

L'identification des propriétés diélectriques des différentes plaques composites réalisées pourront mieux justifier le mouvement interfacial entre les structures tissées et la matrice lors de l'application des sollicitations en traction. Les plaques composites réalisées ont été fabriquées à base de résine époxy. Le recours à d'autres types de résines thermodurcissables serait à étudier afin de choisir la matrice appropriée en termes d'adhésion et de résistance à la fibre de sisal.

Bibliographie

- [1] C. Browaeys, “Chapitre 4 Les matériaux composites à base de fibres,” in *Les enjeux des nouveaux matériaux textiles*, EDP Sciences, 2021, pp. 85–118.
- [2] M. Maria, “Advanced composite materials of the future in aerospace industry,” *Incas Bull.*, vol. 5, no. 3, pp. 139–150, 2013, doi: 10.13111/2066-8201.2013.5.3.14.
- [3] M. Patel, B. Pardhi, S. Chopara, and M. Pal, “Lightweight Composite Materials for Automotive - A Review,” *Concepts J. Appl. Res.*, vol. 3, no. 7, pp. 1–9, 2018.
- [4] S. Rudov-Clark, A. P. Mouritz, L. Lee, and M. K. Bannister, “Fibre damage in the manufacture of advanced three-dimensional woven composites,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 34, no. 10, pp. 963–970, 2003, doi: 10.1016/S1359-835X(03)00213-6.
- [5] G. Couégnat, “Approche multiéchelle du comportement mécanique de matériaux composites à renfort tissé,” Thèse de doctorat, Université Sciences et Technologies-Bordeaux I, 2008.
- [6] K. Halada, “Progress of ecomaterials toward a sustainable society,” *Curr. Opin. Solid State Mater. Sci.*, vol. 7, no. 3, pp. 209–216, 2003, doi: 10.1016/j.cossms.2003.09.007.
- [7] K. El Aynaoui and P.-R. Agénor, “Maroc Stratégie de croissance à l’ horizon 2025 dans un environnement international en mutation,” p. 181, 2015.
- [8] F. Z. Arrakhiz, M. El achaby, M. Malha, M. O. Bensalah, O. Fassi-Fehri, R. Bouhfid, K. Benmoussa, and A. Qaiss, “Mechanical and thermal properties of natural fibers reinforced polymer composites: Doum/low density polyethylene,” *Mater. Des.*, vol. 43, pp. 200–205, 2013, doi: 10.1016/j.matdes.2012.06.056.
- [9] F. Z. Arrakhiz, M. El Achaby, K. Benmoussa, R. Bouhfid, E. M. Essassi, and A. Qaiss, “Evaluation of mechanical and thermal properties of Pine cone fibers reinforced compatibilized polypropylene,” *Mater. Des.*, vol. 40, pp. 528–535, 2012, doi: 10.1016/j.matdes.2012.04.032.
- [10] M. Malha, S. Nekhlaoui, H. Essabir, K. Benmoussa, M. O. Bensalah, F. Arrakhiz, E. Bouhfid, and A. Qaiss, “Mechanical and thermal properties of compatibilized polypropylene reinforced by woven doum,” *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 130, no. 6, pp. 4347–4356, 2013, doi: 10.1002/app.39619.
- [11] P. V. Joseph, K. Joseph, and S. Thomas, “Short sisal fiber reinforced polypropylene composites: The role of interface modification on ultimate properties,” *Compos. Interfaces*, vol. 9, no. 2, pp. 171–205, 2002, doi: 10.1163/156855402760116094.
- [12] A. Belaadi, A. Bezazi, M. Bourchak, and F. Scarpa, “Tensile static and fatigue behaviour of sisal fibres,” *Mater. Des.*, vol. 46, pp. 76–83, 2013, doi: 10.1016/j.matdes.2012.09.048.
- [13] O. J. T. Corbière-Nicollier, B. Gfeller Laban, L. Lundquist, Y. Leterrier, J.A.E Manson, “Life cycle assessment of biofibres replacing glass fibres as reinforcement in plastics.,” *Conserv. Recycl.*, vol. 33, pp. 267–287, 2001.
- [14] T. P. Sathishkumar, P. Navaneethakrishnan, S. Shankar, R. Rajasekar, and N. Rajini, “Characterization of natural fiber and composites - A review,” *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 32, no. 19, pp. 1457–1476, 2013, doi: 10.1177/0731684413495322.
- [15] E. H. Saidane, “Etude de l’effet du vieillissement hygrothermique sur le comportement mécanique d’éco-composites à renfort hybride,” UNIVERSITÉ DE REIMS CHAMPAGNE-ARDENNE, 2015.
- [16] N. S. Karaduman, Y. Karaduman, H. Ozdemir, and G. Ozdemir, “Textile Reinforced Structural Composites for Advanced Applications,” in *Textiles for Advanced Applications*, 2017.
- [17] M. O. H. C. et H. J. C. Milanese, Andressa Cecília and Voorwald., “Thermal and mechanical behaviour of sisal/phenolic composites,” *Compos. Part B*, vol. 43, no. 7, pp.

- 2843–2850, 2012.
- [18] M. K. T. et R. K. G. Thakur, Vijay Kumar, “Review: Raw Natural Fiber–Based Polymer Composites,” *Int. J. Polym. Anal. Charact.*, vol. 19, no. 3, pp. 256–271, 2014.
- [19] C. Baley, “Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites,” *Techniques de l’ingénieur*, 2013. .
- [20] D.U. Shah, “Comprehensive Ashby-type materials selection charts,” *Mater. Des.*, vol. 62, pp. 21–31, 2014.
- [21] J. Mussig and M. Hughes, “Flax and hemp fibers: a natural solution for the composite industry,” *Jec Compos.*, vol. 2012, pp. 40–41, 2012.
- [22] D. U. Shah, “Natural fibre composites: Comprehensive Ashby-type materials selection charts,” *Mater. Des.*, vol. 62, 2014, doi: 10.1016/j.matdes.2014.05.002.
- [23] M. R. Mansor, M. T. Mastura, S. M. Sapuan, and A. Z. Zainudin, *The environmental impact of natural fiber composites through life cycle assessment analysis*. Elsevier Ltd, 2018.
- [24] M. Fehri, “Comportements mécanique et hydrique des composites renforcés par des fibres naturelles et / ou conventionnelles Meriem Fehri To cite this version : HAL Id : tel-01871108,” Thèse de doctorat. Normandie Université; Université de Sfax (Tunisie)., 2018.
- [25] K. Rohit and S. Dixit, “A review - future aspect of natural fiber reinforced composite,” *Polym. from Renew. Resour.*, vol. 7, no. 2, pp. 43–60, 2016, doi: 10.1177/204124791600700202.
- [26] T. Peijs, “Natural fiber based composites,” *Mater. Technol.*, vol. 15, no. 4, pp. 281–285, 2000, doi: 10.1080/10667857.2000.11752892.
- [27] J. Wertz, “Les biocomposites et composites polymère-chanvre en particulier,” Rapport, Unité de Chimie biologique industrielle, Université de Liège – Gembloux Agro-Bio Tech, 2014.
- [28] I. Bensadoun, F., Pariset, J., Pil, L., & Verpoest, “Why are designers fascinated by flax and hemp fibre composites,” *Compos. part A*, vol. 83, pp. 193–205, 2016.
- [29] C. D. Coutellier, “Le développement de la fibre de chanvre dans l ’ industrie automobile,” Université catholique de Louvain, 2016.
- [30] S. Lasker and B. Moir, “RAPPORT DE LA QUATRIÈME CONSULTATION INTERSESSIONS SUR LES FIBRES NATURELLES LONDRES (ROYAUME-UNI), 26 NOVEMBRE 2001,” Salvador (Brésil). [Online]. Available: <http://www.fao.org/3/y8288f/y8288f.htm>.
- [31] A. Bourmaud, J. Beaugrand, D. U. Shah, V. Placet, and C. Baley, “Towards the design of high-performance plant fibre composites,” *Prog. Mater. Sci.*, vol. 97, no. July 2017, pp. 347–408, 2018, doi: 10.1016/j.pmatsci.2018.05.005.
- [32] P. Zakikhani, R. Zahari, M. T. H. Sultan, and D. L. Majid, “Extraction and preparation of bamboo fibre-reinforced composites,” *Mater. Des.*, vol. 63, pp. 820–828, 2014, doi: 10.1016/j.matdes.2014.06.058.
- [33] M. G. Maya, S. C. George, T. Jose, M. S. Sreekala, and S. Thomas, “Mechanical properties of short sisal fibre reinforced phenol formaldehyde eco-friendly composites,” *Polym. from Renew. Resour.*, vol. 8, no. 1, pp. 27–42, 2017, doi: 10.1177/204124791700800103.
- [34] R. Sethunarayanan, S. Chockalingam, and R. Ramanathan, “Natural fiber reinforced concrete,” *Transp. Res. Rec.*, no. 1226, 1989, doi: 10.1533/9780857095583.2.154.
- [35] T. Mikshina, P., Chernova, T., Chemikosova, S., Ibragimova, N., Mokshina, N., & Gorshkova, “Cellulosic fibers: role of matrix polysaccharides,” in *structure and function*, Rijeka, Ed. InTech, 2013, pp. 91–112.
- [36] M. M. and R. B. J. Bidlack, “Molecular structure and component integration of secondary

- cell walls in plants,” *Proc. Oklahoma Acad. Sci.*, vol. 72, pp. 51–56, 1992.
- [37] M. P. Pietak, A., Korte, S., Tan, E., Downard, A., & Staiger, “Atomic force microscopy characterization of the surface wettability of natural fibres,” *Appl. Surf. Sci.*, vol. 253, no. 7, pp. 3627–3635, 2007.
- [38] A. F. Silva, R., Haraguchi, S. K., Muniz, E. C., & Rubira, “Aplicações de fibras lignocelulósicas na química de polímeros e em compósitos,” *Quim. Nova*, vol. 32, no. 3, pp. 661–671, 2009.
- [39] J. W. S. HEARLE, “The fine structure of fibers and crystalline polymers. III. Interpretation of the mechanical properties of fibers.,” *J Appl Polym Sci*, vol. 7, pp. 1207–1223, 1963.
- [40] R.-C. Sun, X.-F. Sun, and J.-L. Wen, “Fractional and structural characterization of lignins isolated by alkali and alkaline peroxide from barley straw,” *J. Agric. Food Chem.*, vol. 49, no. 11, pp. 5322–5330, 2001.
- [41] M. EL BOUSTANI, “Modification Des Fibres Végétales Par Un Procédé Écologique: Effets Sur La Microstructure Et La Compatibilité Avec Les Matrices Polymériques,” Thèse de doctorat. Université du Québec à Trois-Rivières., 2016.
- [42] M. DALLEL, “Evaluation du potentiel textile des fibres d’Alfa (*Stipa Tenacissima* L.): Caractérisation physico-chimique de la fibre au fil.,” Thèse de doctorat. Université de Haute Alsace-Mulhouse, 2012.
- [43] J.-M. Teuscher, “Neue experimentelle Designs zum Thema Naturstoffe im Chemieunterricht: Chemie mit Pilzen,” 2011, [Online]. Available: <http://www.db-thueringen.de/servlets/DerivateServlet/Derivate-24298/Teuscher/Dissertation.pdf>.
- [44] M. A. M. and S. K. S.Taj, “Natural fiber-reinforced polymer composites,” *Proceedings Pakistan Acad. Sci.*, vol. 44, no. 2, 2007.
- [45] A. B. and J. Gassan, “Composites reinforced with cellulose based fibres,” *Prog. Polym. Sci.*, vol. 24, pp. 221–274, 1999.
- [46] S. Vigneshwaran, R. Sundarakannan, K.M. John, R. Deepak Joel Johnson, K. Arun Prasath, S. Ajith, V. Arumugaprabu, and M. Uthayakumar, “Recent advancement in the natural fiber polymer composites: A comprehensive review,” *J. Clean. Prod.*, vol. 277, p. 124109, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124109.
- [47] Y. Wu, Y. Li, and B. Niu, “Assessment of the mechanical properties of sisal fiber-reinforced silty clay using triaxial shear tests,” *Sci. World J.*, vol. 2014, 2014, doi: 10.1155/2014/436231.
- [48] K. Senthilkumar, N. Saba, N. Rajini, M. Chandrasekar, M. Jawaid, S. Siengchin, and O Y. Alotman, “Mechanical properties evaluation of sisal fibre reinforced polymer composites: A review,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 174, pp. 713–729, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.143.
- [49] M. Grégoire, B. Barthod-Malat, L. Labonne, P. Evon, E. De Luycker, and P. Ouagne, “Investigation of the potential of hemp fibre straws harvested using a combine machine for the production of technical load-bearing textiles,” *Ind. Crops Prod.*, vol. 145, p. 111988, 2020, doi: 10.1016/j.indcrop.2019.111988.
- [50] A. A. Okeala, S. O. Abuodha, and J. Mwero, “Experimental investigation of the physical and mechanical properties of sisal fiber-reinforced concrete,” *Fibers*, vol. 6, no. 3, pp. 1–16, 2018, doi: 10.3390/fib6030053.
- [51] A. Bourmaud, J. Beaugrand, D. U. Shah, V. Placet, and C. Baley, “Towards the design of high-performance plant fibre composites,” *Prog. Mater. Sci.*, vol. 97, no. May, pp. 347–408, 2018, doi: 10.1016/j.pmatsci.2018.05.005.
- [52] N. E. Zafeiropoulos and C. A. Baillie, “A study of the effect of surface treatments on the tensile strength of flax fibres: Part II. Application of Weibull statistics,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 38, no. 2, pp. 629–638, 2007, doi:

- 10.1016/j.compositesa.2006.02.005.
- [53] M. Fan, “Characterization and performance of elementary hemp fibres: Factors Influencing tensile strength,” *BioResources*, vol. 5, no. 4, pp. 2307–2322, 2010, doi: 10.15376/biores.5.4.2307-2322.
- [54] F. de A. Silva, N. Chawla, and R. D. de T. Filho, “Tensile behavior of high performance natural (sisal) fibers,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 68, no. 15–16, pp. 3438–3443, 2008, doi: 10.1016/j.compscitech.2008.10.001.
- [55] V. P. Lacet, F. T. Rivaudey, O. C. Isse, V. G. U. Etel, and L. B. Oubakar, “Influence du diamètre sur le module d ’ Young apparent des fibres de chanvre . Effet géométrique ou microstructural?,” *Cellul. Chem. Technol.*, pp. 1–6, 2011, [Online]. Available: http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/46782/cfm2011_238.pdf?sequence=1.
- [56] M. Boudiaf, “Caractérisation physique d’une fibre végétale (le DISS),” Thèse de doctorat.Université Mohamed BOUDIAF de M’Sila., 2016.
- [57] R. Moriana, F. Vilaplana, S. Karlsson, and A. Ribes, “Correlation of chemical, structural and thermal properties of natural fibres for their sustainable exploitation,” *Carbohydr. Polym.*, vol. 112, pp. 422–431, 2014, doi: 10.1016/j.carbpol.2014.06.009.
- [58] K. Ram and P. K. Bajpai, “Effect of Chemical Treatment on Thermal Properties of Natural Fibers,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 455, no. 1, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/455/1/012114.
- [59] A. Manral and P. K. Bajpai, “Analysis of Natural fiber constituents: A Review,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 455, no. 1, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/455/1/012115.
- [60] F. Bensadoun, I. Verpoest, J. Baets, J. Mussig, N. Graupner, P. Davies, M. Gomina, A. Kervoelen, and C. Baley, “Impregnated fibre bundle test for natural fibres used in composites,” *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 36, no. 13, pp. 942–957, 2017, doi: 10.1177/0731684417695461.
- [61] R. Sepe, F. Bollino, L. Boccarusso, and F. Caputo, “Influence of chemical treatments on mechanical properties of hemp fiber reinforced composites,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 133, pp. 210–217, 2018, doi: 10.1016/j.compositesb.2017.09.030.
- [62] A. Prapavesis, V. Tojaga, S. Östlund, and A. Willem van Vuure, “Back calculated compressive properties of flax fibers utilizing the Impregnated Fiber Bundle Test (IFBT),” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 135, no. April, p. 105930, 2020, doi: 10.1016/j.compositesa.2020.105930.
- [63] A. Lefeuvre, A. Bourmaud, C. Morvan, and C. Baley, “Tensile properties of elementary fibres of flax and glass: Analysis of reproducibility and scattering,” *Mater. Lett.*, vol. 130, pp. 289–291, 2014, doi: 10.1016/j.matlet.2014.05.115.
- [64] S. Mishra, A. K. Mohanty, L. T. Drzal, M. Misra, and G. Hinrichsen, “A review on pineapple leaf fibers, sisal fibers and their biocomposites,” *Macromolecular Materials and Engineering*, vol. 289, no. 11. 2004, doi: 10.1002/mame.200400132.
- [65] R. Malkapuram, V. Kumar, and Y. Singh Negi, “Recent development in natural fiber reinforced polypropylene composites,” *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 28, no. 10, 2009, doi: 10.1177/0731684407087759.
- [66] L. Y. Mwaikambo and M. P. Ansell, “Mechanical properties of alkali treated plant fibres and their potential as reinforcement materials. I. hemp fibres,” *J. Mater. Sci.*, vol. 41, no. 8, 2006, doi: 10.1007/s10853-006-5098-x.
- [67] B. Madsen, A. Thygesen, and H. Lilholt, “Plant fibre composites - porosity and stiffness,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 69, no. 7–8, pp. 1057–1069, 2009, doi: 10.1016/j.compscitech.2009.01.016.
- [68] G. M. B. & K. C. A. K. T. D. Nikam, “Somatic embryogenesis in sisal (*Agave sisalana*

- Perr. ex. Engelm),” *Plant Cell Rep.*, vol. 22, no. 3, pp. 188–194, 2003.
- [69] C. Auguste, “Les Agaves comme producteurs de fibres et d’alcool,” *J. d’agriculture Tradit. Bot. appliquée*, vol. 8, no. 78, pp. 105–116, 1928.
- [70] M. Dahal, K.R., Utomo, B.I. & Brink, “Agave sisalana Perrine,” in *Plant Resources of South-East Asia*, no. 17, R. P. Brink, M. & Escobin, Ed. Backhuys, 2003, pp. 68–75.
- [71] J. El-Hilaly, M. Hmammouchi, and B. Lyoussi, “Ethnobotanical studies and economic evaluation of medicinal plants in Taounate province (Northern Morocco),” *J. Ethnopharmacol.*, vol. 86, no. 2–3, pp. 149–158, 2003, doi: 10.1016/S0378-8741(03)00012-6.
- [72] W. . Armstrong, “Plant Fibers Wayne’s Word,” <http://waynesword.palomar.edu/traug99.htm>. (Accessed on: 15, 2011), 2010. .
- [73] G. P. M. Miranda, “Agave sisalana, o ouro verde do sertão: O mundo do trabalho e os espaços de resistência narrados pela memória dos velhos sisaleiros do semi-árido paraibano (1970-1990),” *An. do XXVI Simpósio Nac. História - ANPUH*, pp. 1–12, 2011.
- [74] J. Besset, “Bois et matériaux dérivés,” in *Techniques de l’ingénieur*, 1987.
- [75] M. J. J. and S. Thomas, “Biofibres and biocomposites,” *Carbohydr. Polym.*, vol. 71, pp. 343–364, 2008.
- [76] S. Roy, “Natural and Low Cost Roofing Solutions " Sisal Fiber Reinforced Cement Composites " - a Substitute of Asbestos - a Green Chemical Approach ",” *Int. J. Adv. Res. Sci. Eng.*, vol. 6, no. 5, pp. 583–587, 2017.
- [77] J. Luc, “Optimisation des propriétés mécaniques de composites à base de fibres naturelles: Application à un composite de fibre de lin avec un mélange de polyéthylène/polypropylène d’origine post-consommation,” 2015.
- [78] J.-G. Orliac, “Analyse et simulation du comportement anisotrope lors de la mise en forme de renforts tissés interlock,” Thèse de doctorat. INSA de Lyon. INSA LYON, 2012.
- [79] F. K. Ko and G. W. Du, “Textile Preforming,” in *Handbook of Composites*, S. T. Peters, Ed. Boston, MA: Springer US, 1998, pp. 397–424.
- [80] K. Fukuta, E. Aoki, and Y. Nagatsuka, “3D fabrics for structural composites,” in *Proceedings of the 15th textile research symposium*, 1986.
- [81] B. Provost, “Etude et réalisation d’une solution composite à renfort tissé interlock pour la protection balistique de véhicule,” Thèse de doctorat. Valenciennes., 2016.
- [82] Y. S. Rao, N. S. Mohan, N. Shetty, and B. Shivamurthy, “Drilling and structural property study of multi-layered fiber and fabric reinforced polymer composite - a review,” *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 34, no. 14. 2019, doi: 10.1080/10426914.2019.1686522.
- [83] S. Goutianos, T. Peijs, B. Nystrom, and M. Skrifvars, “Development of flax fibre based textile reinforcements for composite applications,” *Appl. Compos. Mater.*, vol. 13, no. 4, pp. 199–215, 2006, doi: 10.1007/s10443-006-9010-2.
- [84] A. Bernava, M. Manins, and G. Strazds, “Woven Structures from Natural Fibres for Reinforcing Composites,” *Mater. Sci. Appl. Chem.*, vol. 31, 2015, doi: 10.7250/msac.2015.005.
- [85] L. Mohammed, M. N. M. Ansari, G. Pua, M. Jawaaid, and M. S. Islam, “A Review on Natural Fiber Reinforced Polymer Composite and Its Applications,” *International Journal of Polymer Science*, vol. 2015. 2015, doi: 10.1155/2015/243947.
- [86] G. M. A. Khan, M. Terano, M. A. Gafur, and M. S. Alam, “Studies on the mechanical properties of woven jute fabric reinforced poly(L-lactic acid) composites,” *J. King Saud Univ. - Eng. Sci.*, vol. 28, no. 1, 2016, doi: 10.1016/j.jksues.2013.12.002.
- [87] S. K. Garkhail, R. W. H. Heijenrath, and T. Peijs, “Mechanical properties of natural-fibre-mat-reinforced thermoplastics based on flax fibres and polypropylene,” *Appl. Compos. Mater.*, vol. 7, no. 5–6, 2000, doi: 10.1023/A:1026590124038.

- [88] B. Baghaei, M. Skrifvars, and L. Berglin, "Manufacture and characterisation of thermoplastic composites made from PLA/hemp co-wrapped hybrid yarn prepregs," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 50, pp. 93–101, 2013, doi: 10.1016/j.compositesa.2013.03.012.
- [89] F. Ahmad, N. Yuvaraj, and P. K. Bajpai, "Influence of reinforcement architecture on static and dynamic mechanical properties of flax/epoxy composites for structural applications," *Compos. Struct.*, vol. 255, 2021, doi: 10.1016/j.compstruct.2020.112955.
- [90] H. N. Dhakal, M. Skrifvars, K. Adekunle, and Z. Y. Zhang, "Falling weight impact response of jute/methacrylated soybean oil bio-composites under low velocity impact loading," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 92, pp. 134–141, 2014, doi: 10.1016/j.compscitech.2013.12.014.
- [91] A. C. Corbin, D. Soulat, M. Ferriera, A. R. Labanieh, X. Gabrion, P. Malécot, and V. Placet, "Towards hemp fabrics for high-performance composites: Influence of weave pattern and features," *Compos. Part B Eng.*, vol. 181, no. September 2019, 2020, doi: 10.1016/j.compositesb.2019.107582.
- [92] M. Nagamadhu, P. Jeyaraj, and G. C. Mohan Kumar, "Influence of textile properties on dynamic mechanical behavior of epoxy composite reinforced with woven sisal fabrics," *Sadhana - Acad. Proc. Eng. Sci.*, vol. 45, no. 1, 2020, doi: 10.1007/s12046-019-1249-z.
- [93] A.-C. Corbin, D. Soulat, M. Ferreira, and A.-R. Labanieh, "Influence of Process Parameters on Properties of Hemp Woven Reinforcements for Composite Applications: Mechanical Properties, Bias-extension Tests and Fabric Forming," *J. Nat. Fibers*, pp. 1–13, 2020.
- [94] A. C. Corbin, F. Boussu, M. Ferreira, and D. Soulat, "Influence of 3D warp interlock fabrics parameters made with flax rovings on their final mechanical behaviour," *J. Ind. Text.*, vol. 49, no. 9, pp. 1123–1144, 2020, doi: 10.1177/1528083718808790.
- [95] H. Lansiaux, D. Soulat, F. Boussu, and A. R. Labanieh, "Manufacture and characterization of 3D warp interlock fabric made of flax roving," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 406, no. 1, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/406/1/012040.
- [96] P. Morand, "Les Textiles Techniques," in *La renaissance de l'industrie*, EDP Sciences, 2021, pp. 109–116.
- [97] M. Jacob, S. Thomas, and K. T. Varughese, "Novel woven sisal fabric reinforced natural rubber composites: Tensile and swelling characteristics," *J. Compos. Mater.*, vol. 40, no. 16, pp. 1471–1485, 2006, doi: 10.1177/0021998306059731.
- [98] S. Goutianos and T. Peijs, "The optimisation of flax fibre yarns for the development of high-performance natural fibre composites," *Adv. Compos. Lett.*, vol. 12, no. 6, pp. 237–241, 2003, doi: 10.1177/096369350301200602.
- [99] D. U. Shah, P. J. Schubel, and M. J. Clifford, "Modelling the effect of yarn twist on the tensile strength of unidirectional plant fibre yarn composites," *J. Compos. Mater.*, vol. 47, no. 4, pp. 425–436, 2013, doi: 10.1177/0021998312440737.
- [100] B. K. Behera and P. K. Hari, *Woven textile structure: Theory and applications*. 2010.
- [101] P. T. Curtis and S. M. Bishop, "An assessment of the potential of woven carbon fibre-reinforced plastics for high performance applications," *Composites*, vol. 15, no. 4, pp. 259–265, 1984, doi: 10.1016/0010-4361(84)90706-7.
- [102] F. Boussu, "Compréhension des paramètres de produit et de procédé de fabrication des tissus 3D interlocks chaîne. Applications en tant que renfort fibreux de solutions de protection à l'impact.," Thèse de doctorat. l'Université de VALENCIENNES ET DU HAINAUTCAMBRESIS., 2014.
- [103] F. Boussu, I. Cristian, and S. Nauman, "General definition of 3D warp interlock fabric architecture," *Compos. Part B Eng.*, vol. 81, pp. 171–188, 2015, doi: 10.1016/j.compositesb.2015.07.013.

- [104] M. A. Abteu, F. Boussu, P. Bruniaux, C. Loghin, and I. Cristian, "Engineering of 3D warp interlock p-aramid fabric structure and its energy absorption capabilities against ballistic impact for body armour applications," *Compos. Struct.*, vol. 225, no. June, p. 111179, 2019, doi: 10.1016/j.compstruct.2019.111179.
- [105] B. N. Cox and M. S. Dadkhah, "The Macroscopic Elasticity of 3D Woven Composites," *J. Compos. Mater.*, vol. 29, no. 6, 1995, doi: 10.1177/002199839502900606.
- [106] U. Kingdom, "Geometrical Modelling and Characterization of 3D Warp Interlock Composites and Their on-Line Structural Health Monitoring Using Flexible," 2011.
- [107] J. Hu, *3-D fibrous assemblies*. 2008.
- [108] Y. Tanzawa, N. Watanabe, and T. Ishikawa, "Interlaminar fracture toughness of 3-D orthogonal interlocked fabric composites," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 59, no. 8, pp. 1261–1270, 1999, doi: 10.1016/S0266-3538(98)00167-5.
- [109] N. K. Naik, S. K. N. Azad, P. D. Prasad, and B. J. Thuruthimattam, "Stress and failure analysis of 3D orthogonal interlock woven composites," *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 20, no. 17, 2001, doi: 10.1106/RG9C-FUP6-NTKC-4PJB.
- [110] M. Dalal, "Contribution à l' étude de la saturation des tissus simples et multicouches : tissus 2D et 3D Mohamed Dalal To cite this version : HAL Id : tel-00841290," Thèse de doctorat. Université de Haute Alsace-Mulhouse, 2013.
- [111] J.-V. Risicato, "Optimisation de l'architecture des fils dans une structure textile 3D pour le renforcement de pièces composites," Thèse de doctorat. Lille 1, 2012.
- [112] X. Chen and P. Potiyaraj, "CAD/CAM of Orthogonal and Angle-Interlock Woven Structures for Industrial Applications," *Text. Res. J.*, vol. 69, no. 9, pp. 648–655, 1999, doi: 10.1177/004051759906900905.
- [113] F. Boussu, F. Veyet, and N. Dumont, "développement d'une machine prototype de tissage pour la réalisation d'échantillons textile 2,5D," Private project A0807017N, OSEO., 2009.
- [114] Z. Ying, X. Hu, X. Cheng, and Z. Wu, "Numerical investigation on the effect of tow tension on the geometry of three-dimensional orthogonally woven fabric," *Text. Res. J.*, vol. 89, no. 18, 2019, doi: 10.1177/0040517518821912.
- [115] J. Vilfayeau, "Modélisation numérique du procédé de tissage des renforts fibreux pour matériaux composites," Thèse de doctorat. INSA de Lyon., 2013.
- [116] A. C. Corbin, D. Soulat, M. Ferreira, A. R. Labanich, X. Gabrion, and V. Placet, "Multi-scale analysis of flax fibres woven fabrics for composite applications," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 406, no. 1, doi: 10.1088/1757-899X/406/1/012016.
- [117] F. Omrani, P. Wang, D. Soulat, and M. Ferreira, "Mechanical properties of flax-fibre-reinforced preforms and composites: Influence of the type of yarns on multi-scale characterisations," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 93, pp. 72–81, 2017, doi: 10.1016/j.compositesa.2016.11.013.
- [118] B. Lee, K. H. Leong, and I. Herszberg, "Effect of weaving on the tensile properties of carbon fibre tows and woven composites," *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 20, no. 8, pp. 652–670, 2001, doi: 10.1106/0A9Q-L2XM-955Y-N469.
- [119] M. Lefebvre, B. Francois, and C. Daniel, "Influence of high-performance yarns degradation inside three-dimensional warp interlock fabric," *J. Ind. Text.*, vol. 42, no. 4, pp. 475–488, 2013, doi: 10.1177/1528083712444298.
- [120] M. A. Abteu, F. Boussu, P. Bruniaux, C. Loghin, and I. Cristian, "Yarn degradation during weaving process and its effect on the mechanical behaviours of 3D warp interlock

- p-aramid fabric for industrial applications,” *J. Ind. Text.*, 2020, doi: 10.1177/1528083720937288.
- [121] M. CHATAIN, “Matériaux composites : présentation générale,” *Tech. l’ingénieur*, no. am5000, 2011.
- [122] F. Daghia and L. Gendre, “Quelques procédés de mise en forme des composites,” 2011. [Online]. Available: <http://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr.sti/files/ressources/pedagogiques/6546/6546-quelques-procedes-de-mise-en-forme-des-composites-ens.pdf>.
- [123] C. Campana, “Durabilité de composites à fibres naturelles : effet du vieillissement couplé sur les performances mécaniques et la réaction au feu,” Thèse de doctorat. Université de Montpellier, 2018.
- [124] A. Gholampour and T. Ozbakkaloglu, *A review of natural fiber composites: properties, modification and processing techniques, characterization, applications*, vol. 55, no. 3. Springer US, 2020.
- [125] P. A. Sreekumar, K. Joseph, G. Unnikrishnan, and S. Thomas, “A comparative study on mechanical properties of sisal-leaf fibre-reinforced polyester composites prepared by resin transfer and compression moulding techniques,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 67, no. 3–4, pp. 453–461, 2007, doi: 10.1016/j.compscitech.2006.08.025.
- [126] M. Baiardo, E. Zini, and M. Scandola, “Flax fibre-polyester composites,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 35, no. 6, pp. 703–710, 2004, doi: 10.1016/j.compositesa.2004.02.004.
- [127] S. Biswas and A. Satapathy, “A comparative study on erosion characteristics of red mud filled bamboo-epoxy and glass-epoxy composites,” *Mater. Des.*, vol. 31, no. 4, pp. 1752–1767, 2010, doi: 10.1016/j.matdes.2009.11.021.
- [128] K. C. Manikandan Nair, S. M. Diwan, and S. Thomas, “Tensile properties of short sisal fiber reinforced polystyrene composites,” *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 60, no. 9, pp. 1483–1497, 1996, doi: 10.1002/(sici)1097-4628(19960531)60:9<1483::aid-app23>3.0.co;2-1.
- [129] S. V. Joshi, L. T. Drzal, A. K. Mohanty, and S. Arora, “Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites?,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 35, no. 3, pp. 371–376, 2004, doi: 10.1016/j.compositesa.2003.09.016.
- [130] P. Wambua, J. Ivens, and I. Verpoest, “Natural fibres: Can they replace glass in fibre reinforced plastics?,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 63, no. 9, pp. 1259–1264, 2003, doi: 10.1016/S0266-3538(03)00096-4.
- [131] V. Mittal, R. Saini, and S. Sinha, “Natural fiber-mediated epoxy composites - A review,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 99, pp. 425–435, 2016, doi: 10.1016/j.compositesb.2016.06.051.
- [132] M. Zwawi, “A Review on Natural Fiber Bio-Composites, Surface Modifications and Applications,” *Molecules*, vol. 26, no. 2, 2021, doi: 10.3390/molecules26020404.
- [133] V. A. Alvarez and A. Vázquez, “Influence of fiber chemical modification procedure on the mechanical properties and water absorption of MaterBi-Y/sisal fiber composites,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 37, no. 10, pp. 1672–1680, 2006, doi: 10.1016/j.compositesa.2005.10.005.
- [134] A. Alavudeen, N. Rajini, S. Karthikeyan, M. Thiruchitrabalam, and N. Venkateshwareen, “Mechanical properties of banana/kenaf fiber-reinforced hybrid polyester composites: Effect of woven fabric and random orientation,” *Mater. Des.*, vol. 66, no. PA, pp. 246–257, 2015, doi: 10.1016/j.matdes.2014.10.067.
- [135] N. Zhou, X. Geng, M. Ye, L. Yao, Z. Shan, and Y. Qiu, “Mechanical and sound adsorption properties of cellular poly (lactic acid) matrix composites reinforced with 3D ramie fabrics woven with co-wrapped yarns,” *Ind. Crops Prod.*, vol. 56, pp. 1–8, 2014, doi: 10.1016/j.indcrop.2014.02.029.

- [136] V. L. P. Salazar, A. L. Leão, D. S. Rosa, J. G. C. Gomez, and R. C. P. Alli, “Biodegradation of Coir and Sisal Applied in the Automotive Industry,” *J. Polym. Environ.*, vol. 19, no. 3, pp. 677–688, 2011, doi: 10.1007/s10924-011-0315-3.
- [137] T. Khan, M. T. Bin Hameed Sultan, and A. H. Ariffin, “The challenges of natural fiber in manufacturing, material selection, and technology application: A review,” *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 37, no. 11, pp. 770–779, 2018, doi: 10.1177/0731684418756762.
- [138] F. M. Al-Oqla and S. M. Sapuan, “Natural fiber reinforced polymer composites in industrial applications: Feasibility of date palm fibers for sustainable automotive industry,” *J. Clean. Prod.*, vol. 66, pp. 347–354, 2014, doi: 10.1016/j.jclepro.2013.10.050.
- [139] L. Pil, F. Bensadoun, J. Pariset, and I. Verpoest, “Why are designers fascinated by flax and hemp fibre composites?,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 83, pp. 193–205, 2016, doi: 10.1016/j.compositesa.2015.11.004.
- [140] M.-B. Bilal, “Étude des corrélations structure-propriétés tinctoriales des fibres d’acide polylactique (PLA),” Thèse de doctorat, Université de Haute Alsace-Mulhouse, 2010.
- [141] Z. Samouh, K. Molnar, F. Boussu, O. Cherkaoui, and R. El Moznine, “Mechanical and thermal characterization of sisal fiber reinforced polylactic acid composites,” *Polym. Adv. Technol.*, vol. 30, no. 3, pp. 529–537, 2019, doi: 10.1002/pat.4488.
- [142] Z. Samouh, O. Cherkaoui, D. Soulat, A. R. Labanieh, F. Boussu, and R. El Moznine, “Identification of the physical and mechanical properties of moroccan sisal yarns used as reinforcements for composite materials,” *Fibers*, vol. 9, no. 2, pp. 1–16, 2021, doi: 10.3390/fib9020013.
- [143] A. Pappu, K. L. Pickering, and V. K. Thakur, “Manufacturing and characterization of sustainable hybrid composites using sisal and hemp fibres as reinforcement of poly (lactic acid) via injection moulding,” *Ind. Crops Prod.*, vol. 137, no. May, pp. 260–269, 2019, doi: 10.1016/j.indcrop.2019.05.040.
- [144] A. Thimonier, “Le microscope électronique à balayage.” <https://www.ecam.fr/materiaux-structures/microscope-electronique-a-balayage/>.
- [145] D. Hammiche, A. Boukerrou, H. Djidjelli, and A. Kervoelen, “Étude des Propriétés Physico-chimiques, Thermiques et Mécaniques des Fibres d’Alfa Grasses,” *Rev. des Compos. des Matériaux Avancés*, vol. 25, no. 1, pp. 7–24, 2019.
- [146] D. Scida, M. Assarar, R. Ayad, and C. Poilâne, “Effet de l’humidité sur le comportement mécanique des composites à fibres de lin,” *17ième Journées Natl. sur les Compos.*, p. 186, 2011.
- [147] N. E. Marcovich, M. M. Reboledo, and M. I. Aranguren, “Moisture diffusion in polyester-woodflour composites,” *Polymer (Guildf.)*, vol. 40, no. 26, pp. 7313–7320, 1999, doi: 10.1016/S0032-3861(99)00093-2.
- [148] T. N. HO THI, “Étude de l’influence de la température et de l’humidité sur les propriétés mécaniques en traction des fibres de chanvre et de coco,” Thèse de doctorat, l’École de Technologie Supérieure de l’Université du Québec.
- [149] M. F. Pucci, P. Liotier, M. Saint-etienne, S. Drapier, and M. Saint-etienne, “Caractérisation de la mouillabilité de fibres – Application aux fibres Caractérisation de la mouillabilité de fibres – Application aux fibres naturelles. Characterization of fiber wettability - Application to natural fibers .,” *Comptes Rendus des JNC 20 – École des Ponts ParisTech*, vol. 1, no. June, pp. 1–10, 2017.
- [150] A. Roy, S. Chakraborty, S. P. Kundu, R. K. Basak, S. Basu Majumder, and B. Adhikari, “Improvement in mechanical properties of jute fibres through mild alkali treatment as demonstrated by utilisation of the Weibull distribution model,” *Bioresour. Technol.*, vol. 107, pp. 222–228, 2012, doi: 10.1016/j.biortech.2011.11.073.
- [151] O. Hamdaoui, “Caractérisation thermique et mécanique de fibres naturelles d’origine

- marine en vue de leur utilisation dans les matériaux de l'habitat," Thèse de doctorat, Paris Est, 2018.
- [152] D. Sedan, "Etude des interactions physico-chimiques aux interfaces fibres de chanvre/ciment. Influence sur les propriétés mécaniques du composite," Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2007.
- [153] B. Hinterstoisser and L. Salmén, "Application of dynamic 2D FTIR to cellulose," *Vib. Spectrosc.*, vol. 22, no. 1–2, pp. 111–118, 2000, doi: 10.1016/S0924-2031(99)00063-6.
- [154] M. Fan, D. Dai, and B. Huang, "Fourier Spectroscopy for Natural Fibers Transform Infrared," in *Fourier Transform Materials Analysis*; Salih, S., Ed.; Intech: Rijeka, Croatia, 2012, pp. 45–68.
- [155] H. C. Srivastava and G. A. Adams, "Uronic Acid Components of Jute Fiber Hemicellulose," *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 81, no. 10, pp. 2409–2412, 1959, doi: 10.1021/ja01519a033.
- [156] J. J. Orfão, F. J. A. Antunes, and J. L. Figueiredo, "Pyrolysis kinetics of lignocelulosic materials—three independent reactions model," *Fuel Energy Abstr.*, vol. 40, no. 5, p. 340, 1999, doi: 10.1016/s0140-6701(99)91196-7.
- [157] M. Poletto, H. L. O. Júnior, and A. J. Zattera, "Thermal Decomposition of Natural Fibers: Kinetics and Degradation Mechanisms," in *Reactions and Mechanisms in Thermal Analysis of Advanced Materials*, Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc, 2015, pp. 515–545.
- [158] M. J. Antal, G. Várhegyi, and E. Jakab, "Cellulose Pyrolysis Kinetics: Revisited," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 37, no. 4, pp. 1267–1275, 1998, doi: 10.1021/ie970144v.
- [159] M. G. Grønli, G. Várhegyi, and C. Di Blasi, "Thermogravimetric Analysis and Devolatilization Kinetics of Wood," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 41, no. 17, pp. 4201–4208, 2002.
- [160] K. tak Lau, P. yan Hung, M. H. Zhu, and D. Hui, "Properties of natural fibre composites for structural engineering applications," *Compos. Part B Eng.*, vol. 136, no. October 2017, pp. 222–233, 2018, doi: 10.1016/j.compositesb.2017.10.038.
- [161] N. F. Norme Européenne, "EN ISO 5079," *Fibres Text. la force rupture l'allongement rupture des fibres Individ. AFNOR, Fr.*, p. 20, 1996.
- [162] C. Baley, "Analysis of the flax fibres tensile behaviour and analysis of the tensile stiffness increase." [Online]. Available: www.elsevier.com/locate/compositesa.
- [163] Z. Samouh, K. Molnar, F. Boussu, O. Cherkaoui, and R. El Moznine, "Mechanical and thermal characterization of sisal fiber reinforced polylactic acid composites," *Polym. Adv. Technol.*, vol. 30, no. 3, 2019, doi: 10.1002/pat.4488.
- [164] J. T. Kim and A. N. Netravali, "Mercerization of sisal fibers: Effect of tension on mechanical properties of sisal fiber and fiber-reinforced composites," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 41, no. 9, pp. 1245–1252, 2010, doi: 10.1016/j.compositesa.2010.05.007.
- [165] E. N. ISO, "10618/2005," *Carbon fibre--determination tensile Prop. resin-impregnated yarn*, 2005.
- [166] B. S. ISO, "14127: 2008, 'Carbon-fibre-reinforced composites--Determination of the resin, fibre and void contents,'" *Br. Stand. Inst.*, 2011.
- [167] E. N. ISO, "527-4. Plastics: Determination of tensile properties: Part 4: Test conditions for isotropic and orthotropic fibre-reinforced plastic composites (ISO 527-4: 1997)," *SÚTN, Bratislava*, 2001.
- [168] H. Ma, Y. Li, and D. Wang, "Investigations of fiber twist on the mechanical properties of sisal fiber yarns and their composites," *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 33, no. 7, pp. 687–696, 2014, doi: 10.1177/0731684413520187.
- [169] NF G07-316, "- Textiles Tests of yarns - Determination of linear density.," 1988.

- [170] NF G07-079, “- Textiles - Testing threads - Determining the twisting of threads by untwisting/retwisting with a double re-test,” 2011.
- [171] B. Madsen, A. Thygesen, and H. Lilholt, “Plant fibre composites - porosity and volumetric interaction,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 67, no. 7–8, pp. 1584–1600, 2007, doi: 10.1016/j.compscitech.2006.07.009.
- [172] H. Lansiaux, D. Soulat, F. Boussu, and A. R. Labanieh, “Development and Multiscale Characterization of 3D Warp Interlock Flax Fabrics with Different Woven Architectures for Composite Applications,” *Fibers*, vol. 8, no. 2, 2020, doi: 10.3390/fib8020015.
- [173] C. L. Tucker and E. Liang, “Stiffness predictions for unidirectional short-fiber composites.pdf,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 59, pp. 655–671, 1999.
- [174] S. Taj, M. A. Munawar, and S. Khan, “Natural fiber-reinforced polymer composites,” *Proceedings-Pakistan Acad. Sci.*, vol. 44, no. 2, p. 129, 2007.
- [175] A. H. Alias, P. M. Tahir, K. Abdan, M. S. Salit, M. S. Wahab, and M. P. Saiman, “Evaluation of kenaf yarn properties as affected by different linear densities for woven fabric laminated composite production,” *Sains Malaysiana*, vol. 47, no. 8, pp. 1853–1860, 2018, doi: 10.17576/jsm-2018-4708-25.
- [176] E. N. ISO, “139,” *Text. Atmos. Cond. Test.*, 2005.
- [177] A. Belaadi, M. Bouchak, and H. Aouici, “Mechanical properties of vegetal yarn: Statistical approach,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 106, pp. 139–153, 2016, doi: 10.1016/j.compositesb.2016.09.033.
- [178] A. Shukla, S. Basak, S. W. Ali, and R. Chattopadhyay, “Development of fire retardant sisal yarn,” *Cellulose*, vol. 24, no. 1, pp. 423–434, 2017, doi: 10.1007/s10570-016-1115-7.
- [179] ISO 2062, “Textiles-Yarns from packages-Determination of single-end breaking force and elongation at brake using constant rate of extension (CRE) tester (ISO 2062: 2009),” *Int. Organ. Stand. Geneva, Switz.*, 2009.
- [180] Z. Samouh, A. Abed, O. Cherkaoui, D. Soulat, A. R. Labanieh, F. Boussu, and R. El moznine, “Investigation on the Properties of 3D Warp Interlock Fabrics Based on Moroccan Sisal Yarns as Reinforcement for Composite Materials,” *J. Nat. Fibers*, vol. 0, no. 0, pp. 1–19, 2021, doi: 10.1080/15440478.2021.1932679.
- [181] D. Xue and H. Hu, “Mechanical properties of biaxial weft-knitted flax composites,” *Mater. Des.*, vol. 46, pp. 264–269, 2013, doi: 10.1016/j.matdes.2012.10.019.
- [182] V. Placet, O. Cissé, and M. Lamine Boubakar, “Nonlinear tensile behaviour of elementary hemp fibres. Part I: Investigation of the possible origins using repeated progressive loading with in situ microscopic observations,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 56, pp. 319–327, 2014, doi: 10.1016/j.compositesa.2012.11.019.
- [183] E. N. ISO, “139: 2005. Textiles--Standard atmospheres for conditioning and testing.” International Organization for Standardization Geneva, 2005.
- [184] E. N. ISO, “4602:2010 Reinforcements — Woven fabrics — Determination of number of yarns per unit length of warp and weft.” International Organization for Standardization Geneva, 2010.
- [185] E. N. ISO, “7211-2 Textiles-Woven fabrics-Construction-Methods of analysis-Determination of number of threads per unit length,” 2017.
- [186] E. N. ISO, “5084: 1999 Textiles. Determination of thickness of textiles and textile products,” 1999.
- [187] E. N. NF, “12127: 1998 Textiles - Étoffes - Détermination de la masse surfacique sur de petits échantillons,” 1998.
- [188] E. N. ISO, “13934-1 “Textiles-Tensile Properties of Fabrics-Part 1: Determination of maximum force and elongation at maximum force using the strip method,” 2013.
- [189] B. Madsen, P. Hoffmeyer, A. B. Thomsen, and H. Lilholt, “Hemp yarn reinforced

- composites - I. Yarn characteristics,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 38, no. 10, pp. 2194–2203, 2007, doi: 10.1016/j.compositesa.2007.06.001.
- [190] ASTM, “D1388: Standard test method for stiffness of fabrics.” Author West Conshohocken, PA, 1996.
- [191] K. Bilisik, “Bending behavior of multilayered and multidirectional stitched aramid woven fabric structures,” *Text. Res. J.*, vol. 81, no. 17, pp. 1748–1761, 2011, doi: 10.1177/0040517511411974.
- [192] F. Yu, S. Chen, J. V. Viisainen, M. P. F. Sutcliffe, L. T. Harper, and N. A. Warrior, “A macroscale finite element approach for simulating the bending behaviour of biaxial fabrics,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 191, no. October 2019, 2020, doi: 10.1016/j.compscitech.2020.108078.
- [193] P. Boisse, J. Colmars, N. Hamila, N. Naouar, and Q. Steer, “Bending and wrinkling of composite fiber preforms and prepregs. A review and new developments in the draping simulations,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 141, no. January, pp. 234–249, 2018, doi: 10.1016/j.compositesb.2017.12.061.
- [194] C. Poppe, T. Rosenkranz, D. Dörr, and L. Kärger, “Comparative experimental and numerical analysis of bending behaviour of dry and low viscous infiltrated woven fabrics,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 124, no. December 2018, p. 105466, 2019, doi: 10.1016/j.compositesa.2019.05.034.
- [195] Q. Liu and M. Hughes, “The fracture behaviour and toughness of woven flax fibre reinforced epoxy composites,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 39, no. 10, pp. 1644–1652, 2008, doi: 10.1016/j.compositesa.2008.07.008.
- [196] L. M. G. Vieira, J. C. dos Santos, T. H. Panzera, J. C. C. Rubio, and F. Scarpa, “Novel fibre metal laminate sandwich composite structure with sisal woven core,” *Ind. Crops Prod.*, vol. 99, pp. 189–195, 2017, doi: 10.1016/j.indcrop.2017.02.008.
- [197] K. Devendra and T. Rangaswamy, “Strength Characterization of E-glass Fiber Reinforced Epoxy Composites with Filler Materials,” *J. Miner. Mater. Charact. Eng.*, vol. 01, no. 06, pp. 353–357, 2013, doi: 10.4236/jmmce.2013.16054.
- [198] ASTM, “D5229 Standard Test Method for Moisture Absorption Properties and Equilibrium Conditioning of Polymer Matrix Composite Materials.,” *Am. Soc. Test. Mater.*, 1992.
- [199] H. Alamri and I. M. Low, “Mechanical properties and water absorption behaviour of recycled cellulose fibre reinforced epoxy composites,” *Polym. Test.*, vol. 31, no. 5, pp. 620–628, 2012, doi: 10.1016/j.polymertesting.2012.04.002.
- [200] M. Péron, A. Céline, F. Jacquemin, and A. Le Duigou, “Hygroscopic stresses in asymmetric biocomposite laminates submitted to various relative humidity conditions,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 134, no. March, p. 105896, 2020, doi: 10.1016/j.compositesa.2020.105896.
- [201] M. Berges, R. Léger, V. Placet, V. Person, S. Corn, X. Gabrion, J. Rousseau, E. Ramasso, P. Ienny, and S. Fontaine, “Influence of moisture uptake on the static, cyclic and dynamic behaviour of unidirectional flax fibre-reinforced epoxy laminates,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 88, 2016, doi: 10.1016/j.compositesa.2016.05.029.
- [202] S. Dhar Malingam, N. L. Feng, A. A. Kamarolzaman, H. Tzy Yi, and A. F. Ab Ghani, “Mechanical Characterisation of Woven Kenaf Fabric as Reinforcement for Composite Materials,” *J. Nat. Fibers*, vol. 18, no. 5, 2021, doi: 10.1080/15440478.2019.1642827.
- [203] W. Wang, M. Sain, and P. A. Cooper, “Study of moisture absorption in natural fiber plastic composites,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 66, no. 3–4, pp. 379–386, 2006, doi: 10.1016/j.compscitech.2005.07.027.
- [204] C. Deo and S. K. Acharya, “Effect of moisture absorption on mechanical properties of

- chopped natural fiber reinforced epoxy composite,” *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 29, no. 16, pp. 2513–2521, 2010, doi: 10.1177/0731684409353352.
- [205] A. A. Bachchan, P. P. Das, and V. Chaudhary, “Effect of moisture absorption on the properties of natural fiber reinforced polymer composites: A review,” *Mater. Today Proc.*, no. xxxx, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.02.812.
- [206] G. M. Kanaginahal, H. S. Hebbar, and S. M. Kulkarni, “Influence of weave pattern and composite thickness on mechanical properties of bamboo/epoxy composites,” *Mater. Res. Express*, vol. 6, no. 12, 2019, doi: 10.1088/2053-1591/ab5a90.
- [207] M. Rajesh and J. Pitchaimani, “Mechanical Properties of Natural Fiber Braided Yarn Woven Composite: Comparison with Conventional Yarn Woven Composite,” *J. Bionic Eng.*, vol. 14, no. 1, pp. 141–150, 2017, doi: 10.1016/S1672-6529(16)60385-2.
- [208] M. P. Ribeiro, L. de Mendonça Neuba, P. H. P. M. da Silveria, F. S. da luz, A. B. H. da Silva Figueiredo, S. N. Monteiro, and M. O. Moreira, “Mechanical, thermal and ballistic performance of epoxy composites reinforced with Cannabis sativa hemp fabric,” *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 12, pp. 221–233, 2021, doi: 10.1016/j.jmrt.2021.02.064.
- [209] H. Abdellaoui, H. Bensalah, J. Echaabi, R. Bouhfid, and A. Qaiss, “Fabrication, characterization and modelling of laminated composites based on woven jute fibres reinforced epoxy resin,” *Mater. Des.*, vol. 68, pp. 104–113, 2015, doi: 10.1016/j.matdes.2014.11.059.
- [210] N. F. Norme, “EN ISO 14125: 1998, Fibre-Reinforced Plastic Composites--Determination of Flexural Properties, ISO Committee, Geneva, 2013.”
- [211] B. Baghaei, M. Skrifvars, and L. Berglin, “Characterization of thermoplastic natural fibre composites made from woven hybrid yarn prepregs with different weave pattern,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 76, pp. 154–161, 2015, doi: 10.1016/j.compositesa.2015.05.029.
- [212] A. Hamdan, F. Mustapha, K. A. Ahmad, A. S. Mohd Rafie, M. R. Ishak, and A. E. Ismail, “The Effect of Customized Woven and Stacked Layer Orientation on Tensile and Flexural Properties of Woven Kenaf Fibre Reinforced Epoxy Composites,” *Int. J. Polym. Sci.*, vol. 2016, 2016, doi: 10.1155/2016/6514041.
- [213] N. F. Norme, “EN ISO 179 Plastics--Determination of Charpy Impact Strength,” 1993.
- [214] K. S. Ahmed, V. Mallinatha, and S. J. Amith, “Effect of ceramic fillers on mechanical properties of woven jute fabric reinforced epoxy composites,” *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 30, no. 15, pp. 1315–1326, 2011, doi: 10.1177/0731684411420606.
- [215] Z. Abbas, S. Shahid, Y. Nawab, K. Shaker, and M. Umair, “Effect of glass microspheres and fabric weave structure on mechanical performance of hemp/green epoxy composites,” *Polym. Compos.*, vol. 41, no. 11, pp. 4771–4787, 2020, doi: 10.1002/pc.25751.
- [216] N. Venkateshwaran, A. ElayaPerumal, and R. H. Arwin Raj, “Mechanical and Dynamic Mechanical Analysis of Woven Banana/Epoxy Composite,” *J. Polym. Environ.*, vol. 20, no. 2, pp. 565–572, 2012, doi: 10.1007/s10924-011-0410-5.
- [217] A. H. A. Rashid, R. Ahmad, M. Jaafar, M. N. Roslan, and S. Ariffin, “Mechanical properties evaluation of woven coir and kevlar reinforced epoxy composites,” *Adv. Mater. Res.*, vol. 277, pp. 36–42, 2011, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.277.36.
- [218] B. A. Muralidhar, V. R. Giridev, and K. Raghunathan, “Flexural and impact properties of flax woven, knitted and sequentially stacked knitted/woven preform reinforced epoxy composites,” *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 31, no. 6, pp. 379–388, 2012, doi: 10.1177/0731684412437987.
- [219] M. K. Singh and S. Zafar, “Effect of layering sequence on mechanical properties of woven kenaf/jute fabric hybrid laminated microwave-processed composites,” *J. Ind. Text.*, 2020, doi: 10.1177/1528083720911219.

- [220] Begum K. and Islam M.A., “Natural fiber as a substitute to synthetic fiber in polymer composites: A review,” *Res. J. Eng. Sci.*, vol. 2, no. 3, pp. 46–53, 2013, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/profile/Md-Akhtarul-Islam/publication/284223539_Natural_fiber_as_a_substitute_to_synthetic_fiber_in_polymer_composites_A_review/links/60273ba0a6fdcc37a8219c8c/Natural-fiber-as-a-substitute-to-synthetic-fiber-in-polymer-composi.
- [221] H. Lansiaux, “Élaboration et caractérisation de renforts tissés 3D interlock chaîne en lin pour matériaux composites,” Thèse de doctorat, Université Lille 1, 2020.

Annexes

Annexe A: Productions Scientifiques

Publications scientifiques :

Samouh, Z., Molnar, K., Boussu, F., Cherkaoui, O., & El Moznine, R. (2019). Mechanical and thermal characterization of sisal fiber reinforced polylactic acid composites. *Polymers for Advanced Technologies*, 30(3), 529-537. <https://doi.org/10.1002/pat.4488>

Mrajji, O., Wazna, M. E., Samouh, Z., Bouari, A. E., Cherkaoui, O., & El Moznine, R. (2020). The effect of nonwoven structure on thermomechanical properties of feather waste reinforced polyester composite. *Journal of Industrial Textiles*, 1528083720947734. <https://doi.org/10.1177/1528083720947734>

Samouh, Z., Cherkaoui, O., Soulat, D., Labanieh, A. R., & Boussu, F. (2021). Identification of the Physical and Mechanical Properties of Moroccan Sisal Yarns Used as Reinforcements for Composite Materials. *Fibers*, 9(2), 13. <https://doi.org/10.3390/fib9020013>

Samouh, Z., Molnár, K., Hajba, S., Boussu, F., Cherkaoui, O., & El Moznine, R. (2021). Elaboration and characterization of biocomposite based on polylactic acid and Moroccan sisal fiber as reinforcement. *Polymer Composites*. <https://doi.org/10.1002/pc.26095>

Samouh, Z., Abed, A., Cherkaoui, O., Soulat, D., Labanieh, A. R., Boussu, F., & Elmoznine, R. (2021). Investigation on the Properties of 3D Warp Interlock Fabrics Based on Moroccan Sisal Yarns as Reinforcement for Composite Materials. *Journal of Natural Fibers*, 1-19. <https://doi.org/10.1080/15440478.2021.1932679>

Samouh, Z., Cherkaoui, O., Soulat, D., Labanieh, A. R., & Boussu, F. (2020, April). Development of 3D warp interlock fabrics based on moroccan natural fibers. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 827, No. 1, p. 012051). IOP Publishing.

Communications orales :

Samouh, Z., Molnar, K., Hajba, S., Boussu, F., Cherkaoui, O., & El Moznine, R. Properties of woven natural fiber reinforced polylactic acid composite, CIRAT 2018, Monastir (Tunisie), 9-10 November 2018.

Samouh Z.; Cherkaoui O.; Soulat D.; Labanieh A R. ; Boussu F., El Moznine R. Development of 3D warp interlocks fabrics based on Moroccan natural fibers, ITMC 2019, Marrakech (Maroc), 13-15 November 2019.

Samouh Z.; Cherkaoui O.; Soulat D.; Labanieh A R. ; Boussu F., El Moznine R. Characterization and Manufacturing of 3D warp interlock fabrics with Moroccan Sisal Yarns, Conference Euromaghreb , 19-20 october 2020, Conférence Virtuelle.

Samouh Z.; Cherkaoui O.; Soulat D.; Labanieh A R. ; Boussu F., El Moznine R. Fabrication et Caractérisation des renforts tissés à base des fils de sisal, 22ièmes Journées Nationales sur les Composites, 28-30 Juin 2021 ,Conférence Virtuelle.

Samouh Z.; Cherkaoui O.; Soulat D.; Labanieh A R. ; Boussu F., El Moznine R. A MULTISCALE APPROACH OF CHARACTERIZATION OF COMPOSITES BASED ON WOVEN FABRIC FROM MOROCCAN NATURAL RESOURCES, AUTEX, 5-9 Septembre 2021, Conférence Virtuelle.

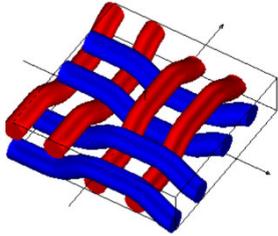
Posters :

Samouh Z.; Cherkaoui O.; Soulat D.; Labanieh A R. ; Boussu F., El Moznine R. Development of 3D warp interlocks fabrics based on Moroccan natural fibers, ITMC 2019, Marrakech (Maroc),13-15 November 2019

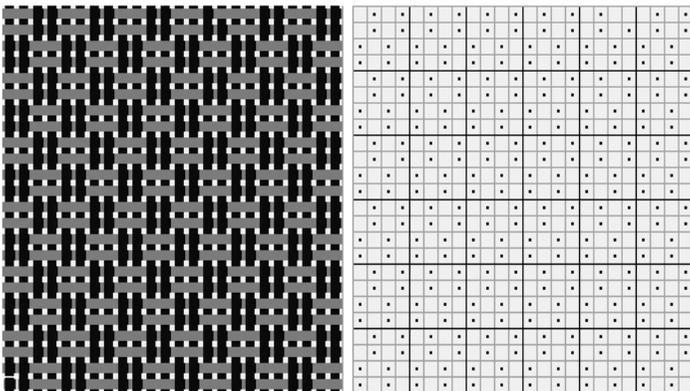
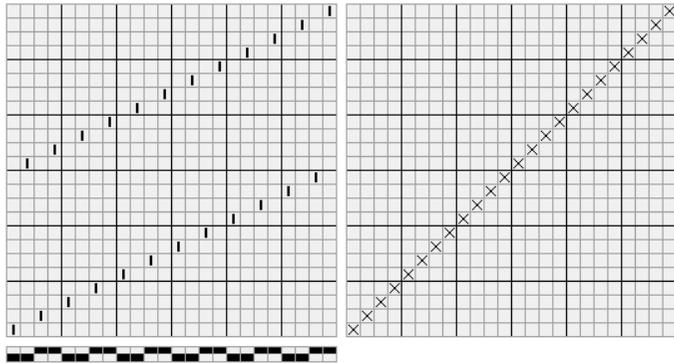
Annexe B: Fiches Techniques des structures tissées 2D en fil de sisal

Fiche Technique Tissu en Fils de Sisal 3300 Tex

Natté 2-2



Carte Générale



Informations générales

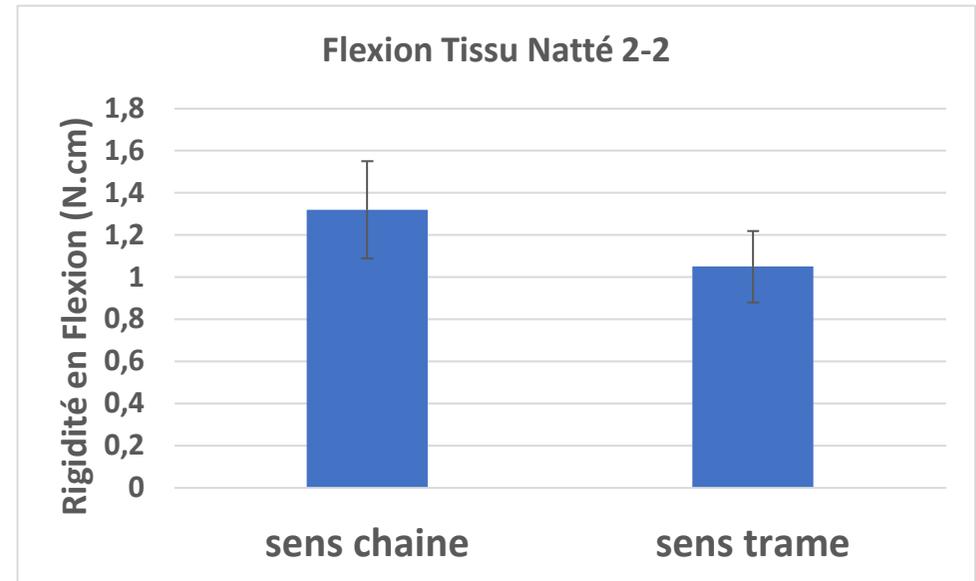
Poids (g/m²)	1395,15± 71,65
Epaisseur (mm)	6,23 ± 0,14
Densité chaine (fils/cm)	2±0,5
Densité trame (duites/cm)	2±0,7

Embuage (%)
4,38±1,66
Retrait (%)
4,27±1,36

Fiche Technique Tissu en Fils de Sisal 3300 Tex

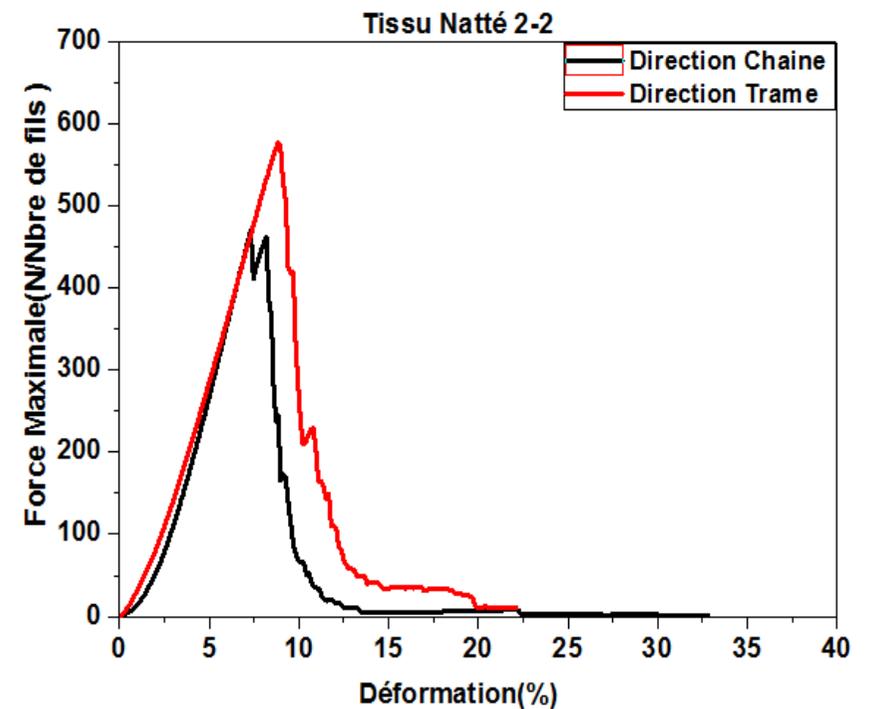
Rigidité en flexion

Sens chaîne (N.cm)	1,32 ± 0,23
Sens trame (N.cm)	1,05 ± 0,17

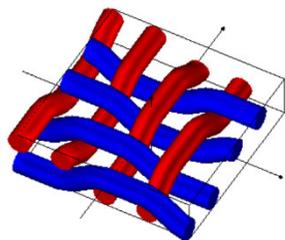


Comportement en traction chaîne et trame

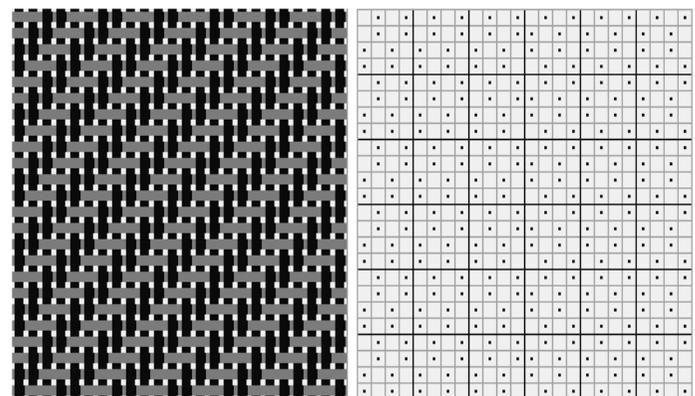
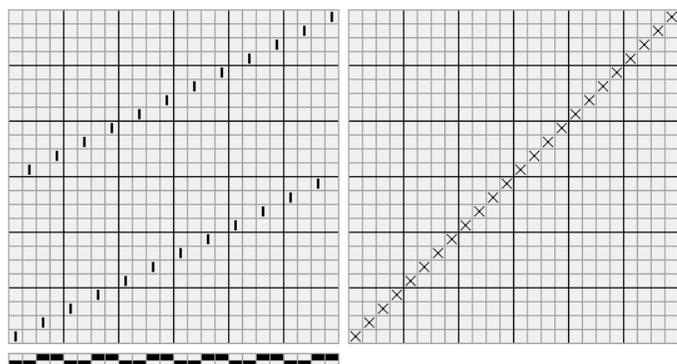
	Sens chaîne	Sens trame
Force maximale (N/Nbre de fils)	456,87±15,37	567,87± 45,87
Déformation à la force maximale (%)	7,16 ± 1,47	8,83 ± 2,65



Croisé 2-2



Carte Générale



Informations générales

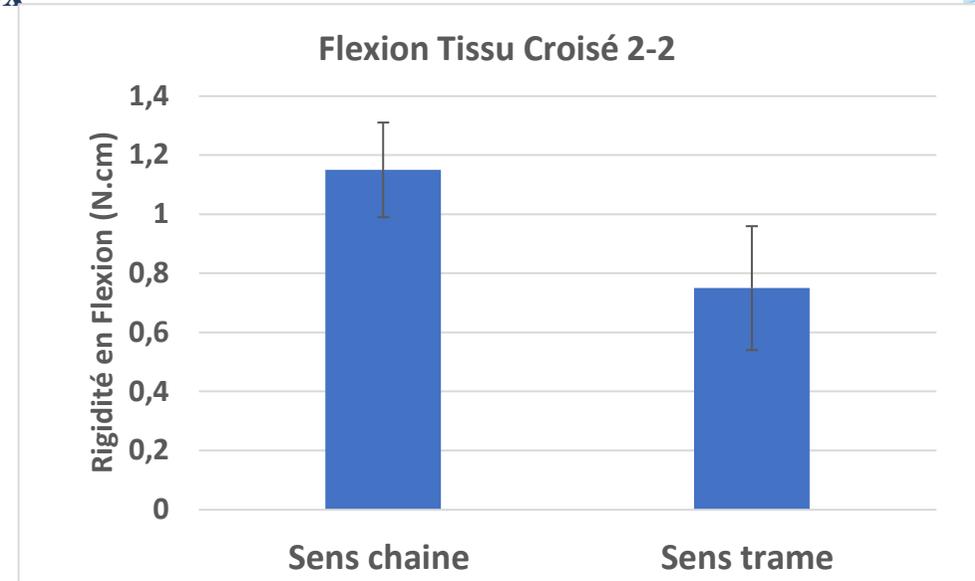
Poids (g/m²)	1145,83 ± 85,52
Epaisseur (mm)	6,12 ± 0,5
Densité chaîne (fils/cm)	2±0,4
Densité trame (duites/cm)	1±0,3

Embuage (%)
2,68 ± 1,98
Retrait (%)
2,12±0,91

Fiche Technique Tissu en Fils de Sisal 3300 Tex

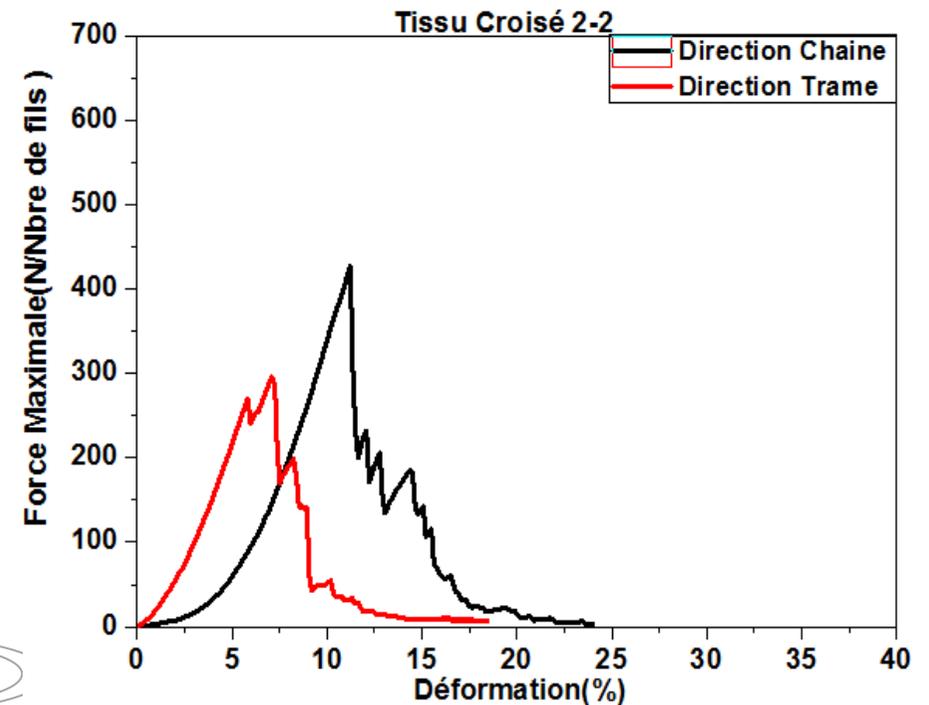
Rigidité en flexion

Sens chaîne (N.cm)	1,15 ± 0,16
Sens trame (N.cm)	0,75 ± 0,21



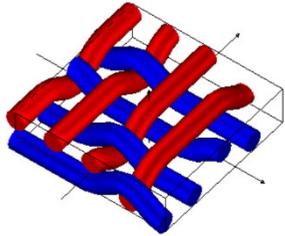
Comportement en traction chaîne et trame

	Sens chaîne	Sens trame
Force maximale (N/nbre de fils)	435,97 ± 26,97	298,97 ± 36,97
Déformation à la force maximale (%)	11,21 ± 2,47	7,10 ± 1,59



Fiche Technique Tissu en Fils de Sisal 3300 Tex

Satin 4

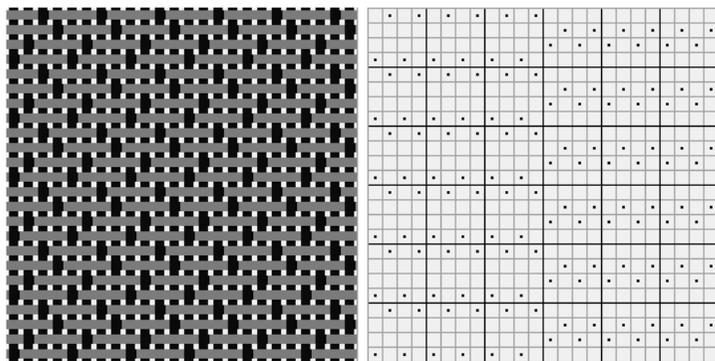
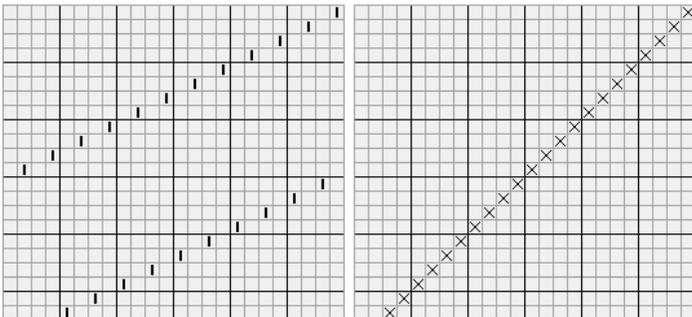


Carte Générale

Informations générales

Poids (g/m²)	937,5 ± 55,52
Epaisseur (mm)	6,35± 0,14
Densité chaîne (fils/cm)	2,0±0,35
Densité trame (duites/cm)	2,2 ±0,45

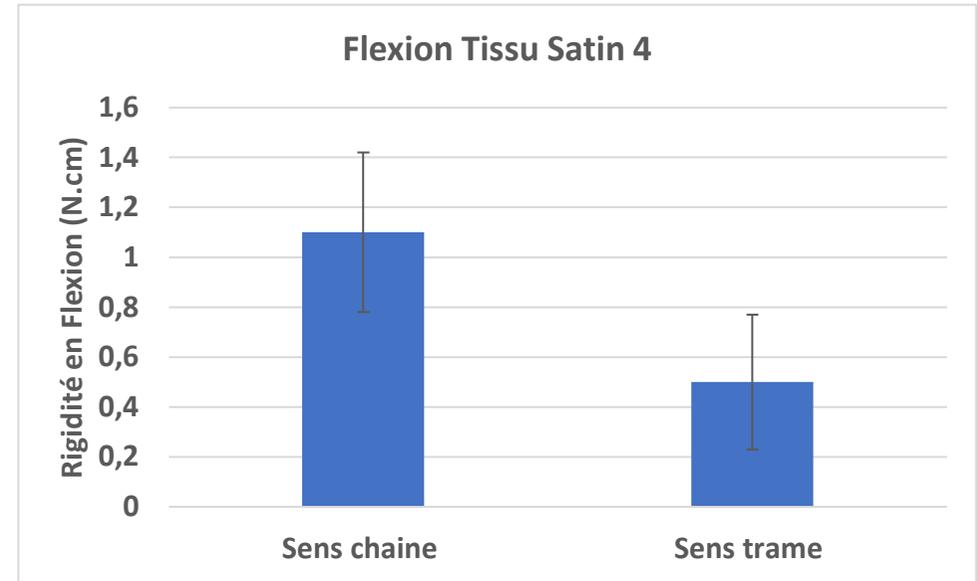
Embuvaie (%)
1,69 ± 0,67
Retrait (%)
1,36 ± 0,75



Fiche Technique Tissu en Fils de Sisal 3300 Tex

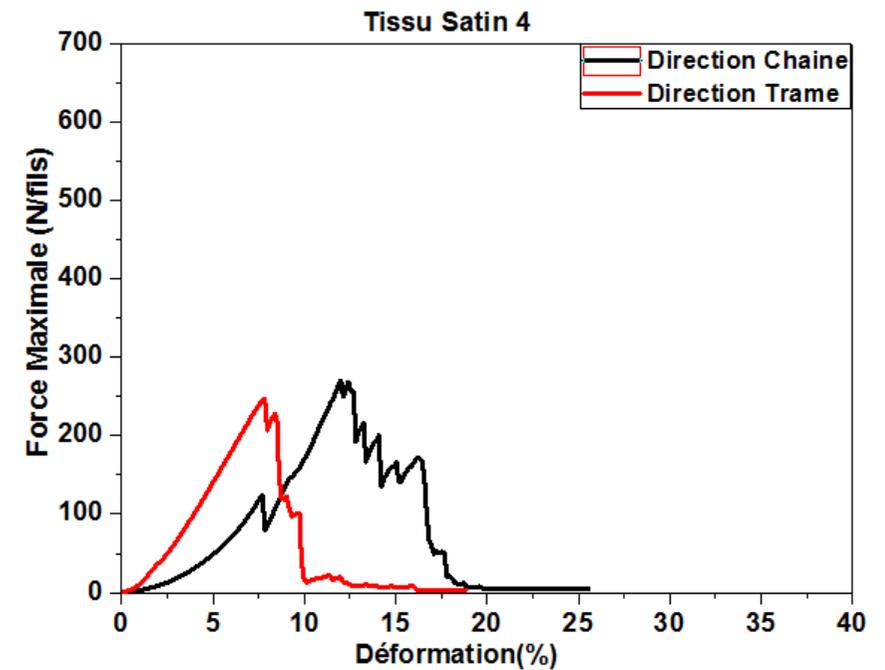
Rigidité en flexion

Sens chaîne (N.cm)	1,10 ± 0,32
Sens trame (N.cm)	0,5 ± 0,27



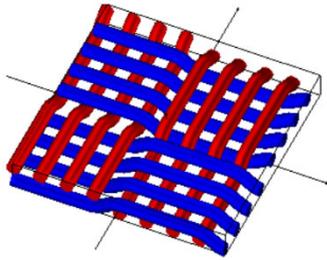
Comportement en traction chaîne et trame

	Sens chaîne	Sens trame
Force maximale (N/nbre de fils)	287,97 ± 53,75	262,86 ± 27,97
Déformation à la force maximale (%)	12,40 ± 3,23	7,82 ± 2,31

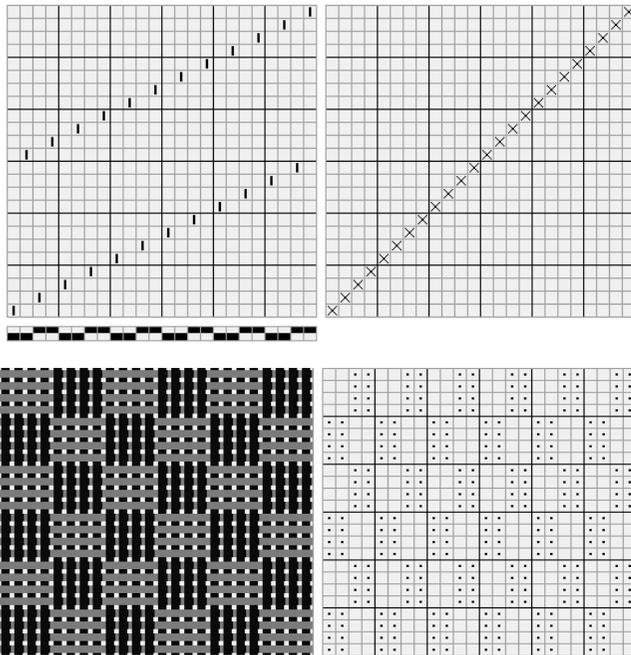


Fiche Technique Tissu en Fils de Sisal 3300 Tex

Natté 4-4



Carte Générale



Informations générales

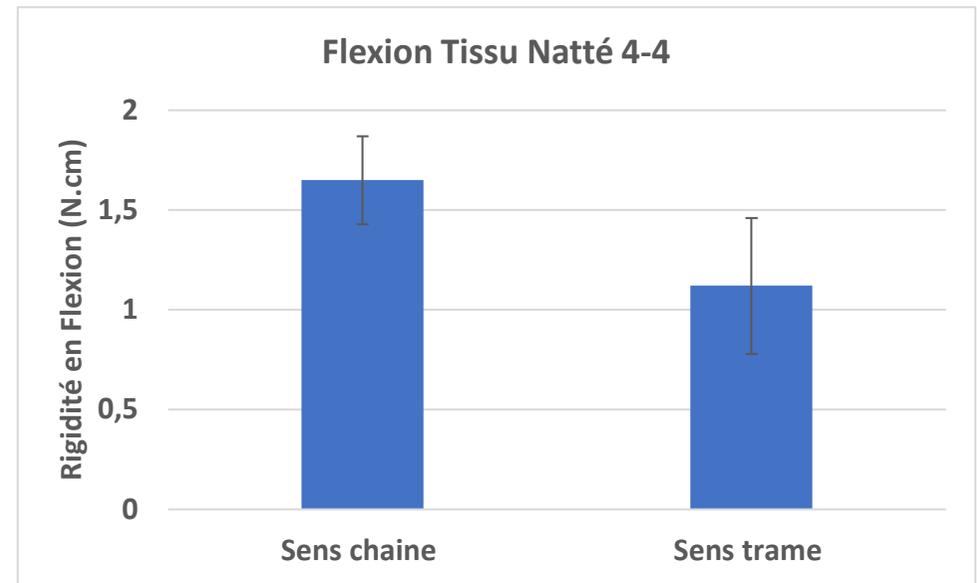
Poids (g/m²)	1812,42 ± 90,65
Epaisseur (mm)	7,1 ± 0,14
Densité chaîne (fils/cm)	3,2 ± 0,23
Densité trame (duites/cm)	3,0 ± 0,31

Embuvaie (%)
5,67 ± 1,52
Retrait (%)
5,45 ± 1,32

Fiche Technique Tissu en Fils de Sisal 3300 Tex

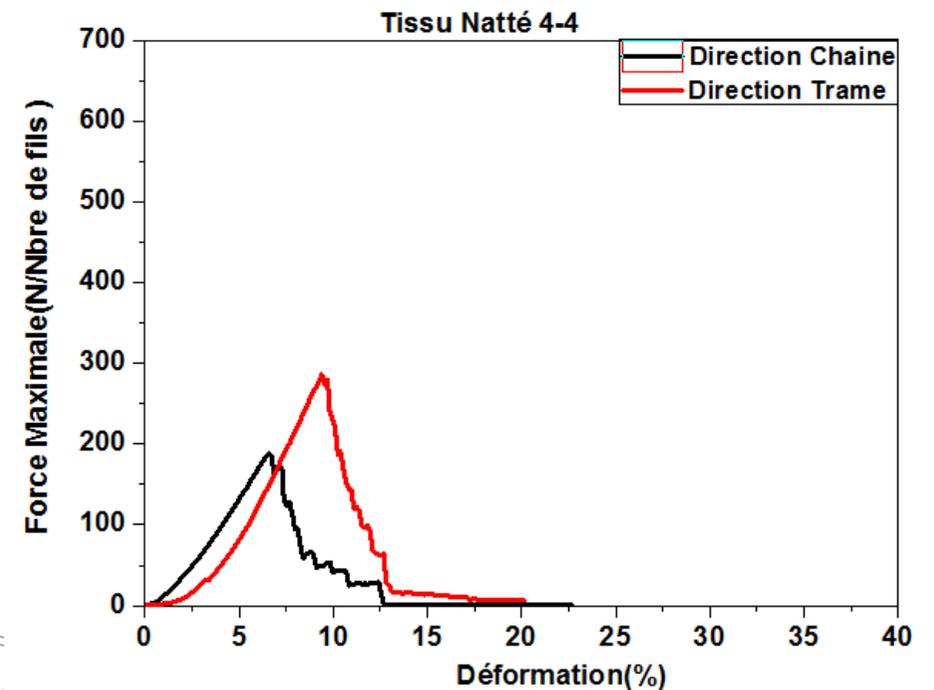
Rigidité en flexion

Sens chaîne (N.cm)	1,65 ± 0,22
Sens trame (N.cm)	1,12 ± 0,34



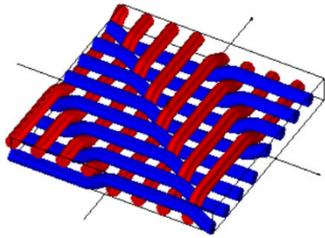
Comportement en traction chaîne et trame

	Sens chaîne	Sens trame
Forcemaximale (N/nbre de fils)	174,87 ± 47,87	309,73 ± 45,86
Déformation à la force maximale (%)	7,13 ± 1,37	9,39 ± 1,95

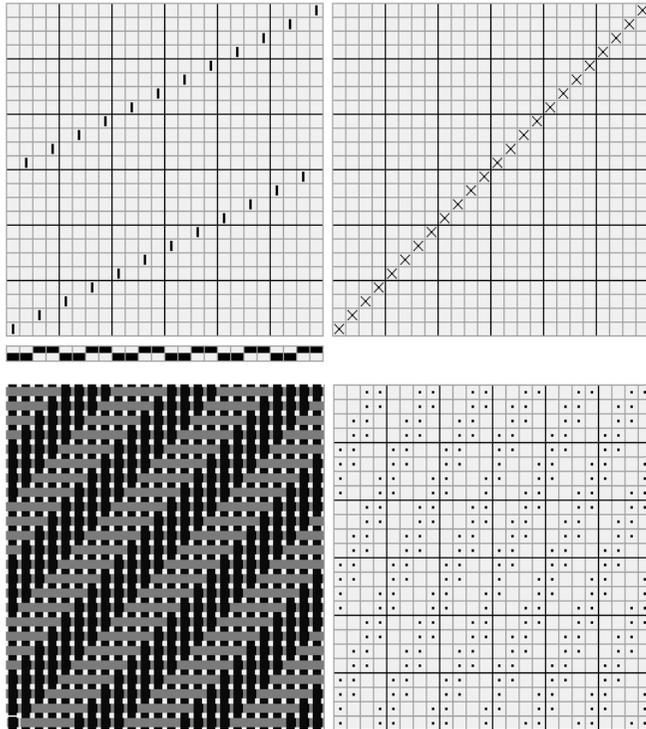


Fiche Technique Tissu en Fils de Sisal 3300 Tex

Croisé 4-4



Carte Générale



Informations générales

Poids (g/m²)	1667,33 ± 87,65
Epaisseur (mm)	6,8 ± 0,14
Densité chaîne (fils/cm)	3,2±0,26
Densité trame (duites/cm)	3,0 ±0,34

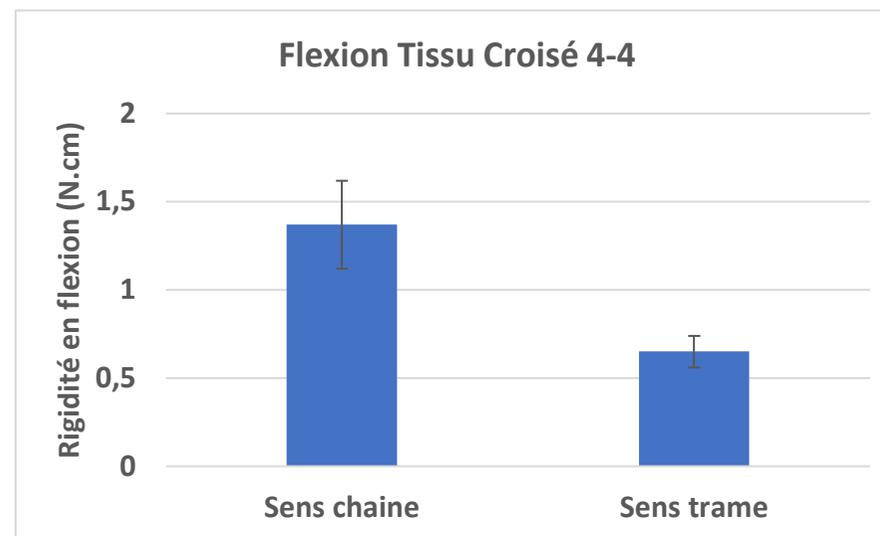
Embuage (%)
4,68 ± 1,69
Retrait (%)
3,98 ± 1,78

Fiche Technique Tissu en Fils de Sisal 3300 Tex



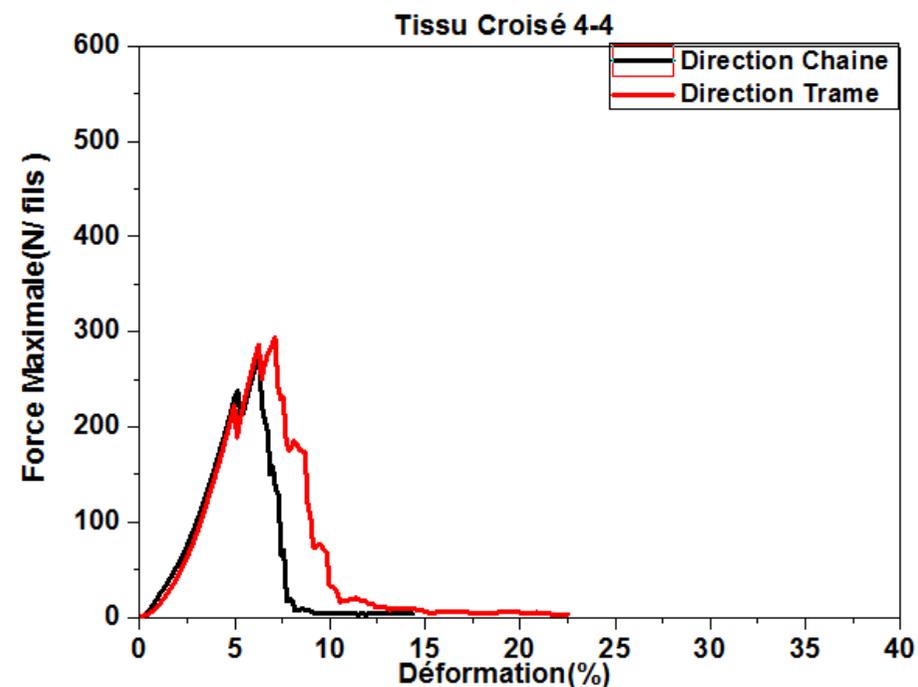
Rigidité en flexion

Sens chaîne (N.cm)	1,37 ± 0,25
Sens trame (N.cm)	0,65 ± 0,09



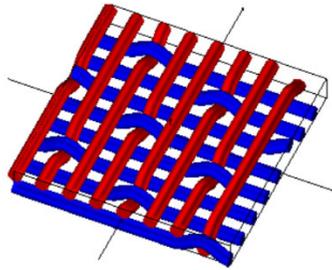
Comportement en traction chaîne et trame

	Sens chaîne	Sens trame
Force maximale (N/nbre de fils)	286,87 ± 46,87	296,87 ± 65,98
Déformation à la force maximale (%)	6,28 ± 1,94	6,10 ± 0,97

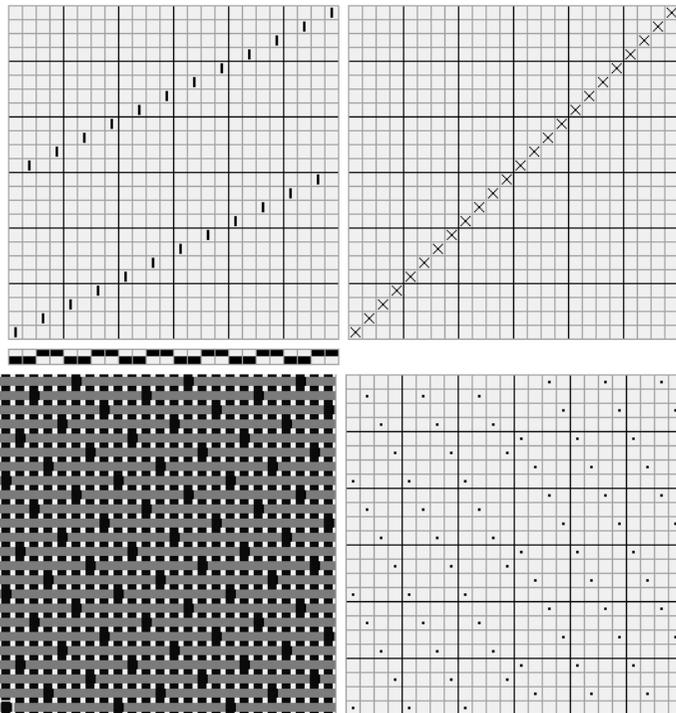


Fiche Technique Tissu en Fils de Sisal 3300 Tex

Satin 8



Carte Générale



Informations générales

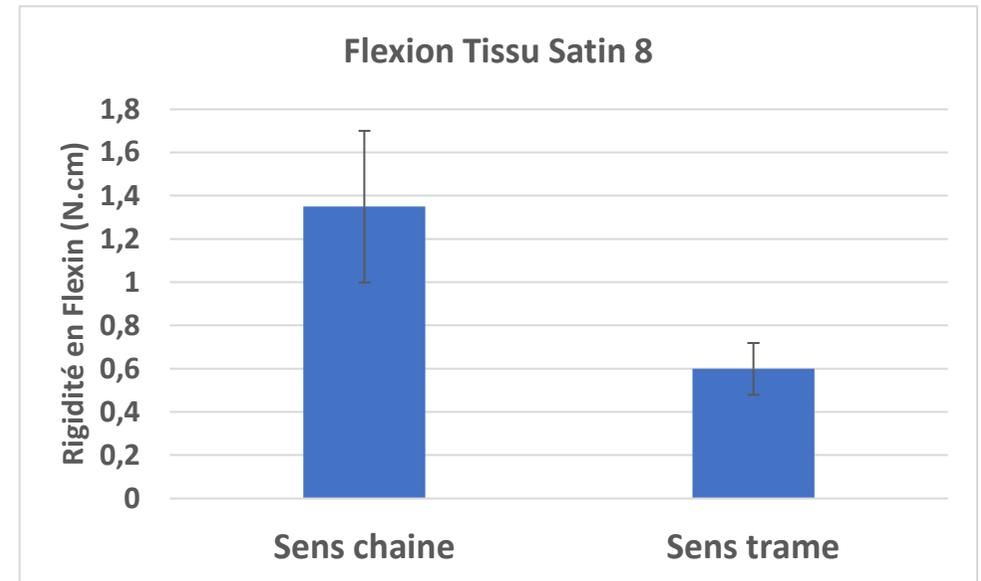
Poids (g/m²)	1553,33 ± 97,61
Epaisseur (mm)	6,75 ± 0,17
Densité chaine (fils/cm)	3,4 ± 0,65
Densité trame (duites/cm)	4,0 ± 0,49

Embuage (%)
2,78 ± 1,45
Retrait (%)
2,45 ± 1,32

Fiche Technique Tissu en Fils de Sisal 3300 Tex

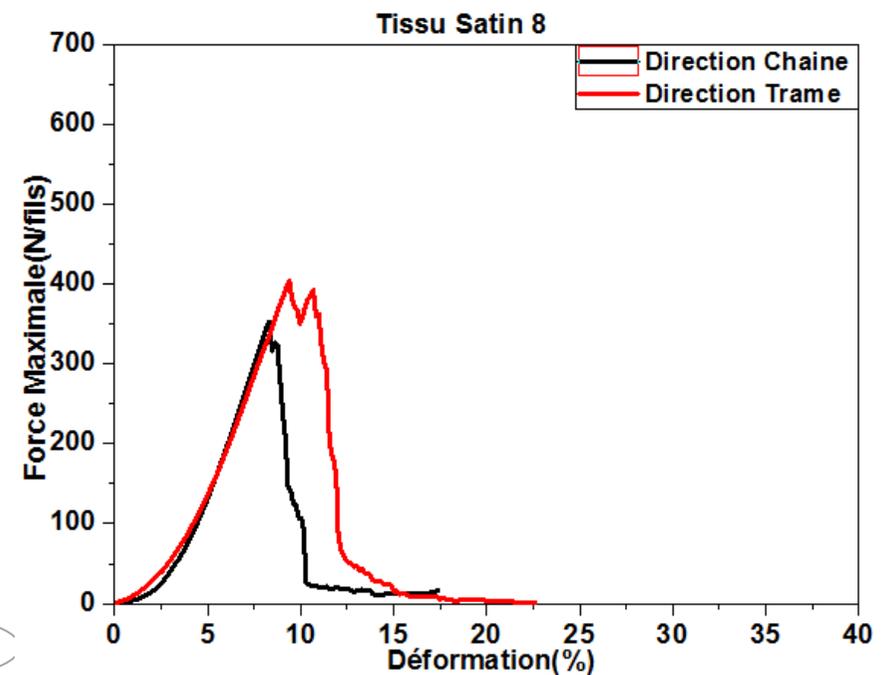
Rigidité en flexion

Sens chaîne (N.cm)	1,35 ± 0,35
Sens trame (N.cm)	0,6 ± 0,12



Comportement en traction chaîne et trame

	Sens chaîne	Sens trame
Force maximale (N/nbre de fils)	345,16 ± 18,32	387,98 ± 48,35
Déformation à la force maximale (%)	8,59 ± 1,57	9,38 ± 2,54

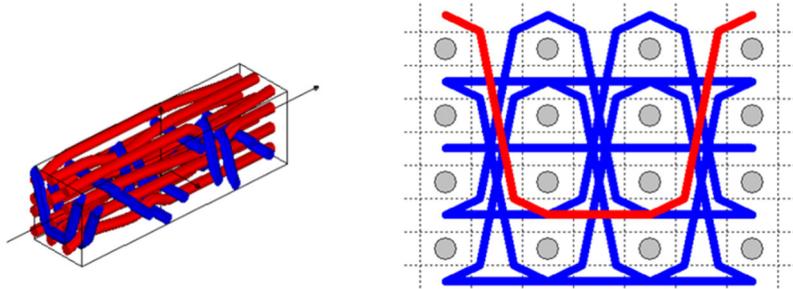


Annexe C: Fiches Techniques des structures tissées 3D interlocks chaines en fil de sisal

Fiche Technique Tissu en Fils de Sisal 3300 Tex

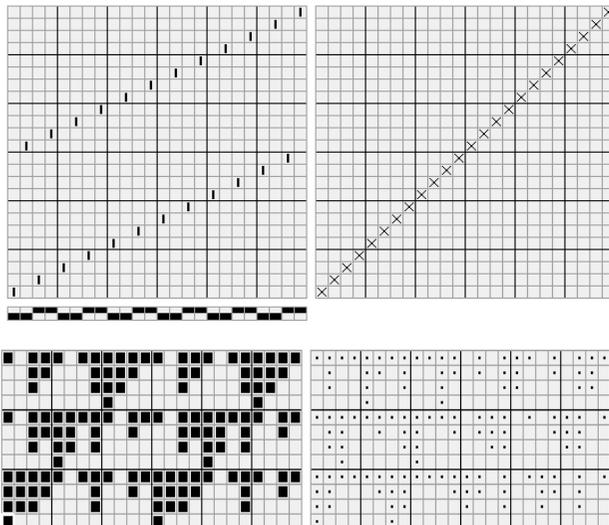
O-L 4 2-3 LIAGE {SERGE 3 EFFET TRAME CORDON A GAUCHE}{1 5 9 - 2 6 10 - # - # - #} - RENFORT {# - 3 8 - 4 11 - 7 12 - #}

Informations générales



Poids (g/m ²)	2172,11 ± 166
Epaisseur (mm)	10 ± 1,5
Densité chaîne (fils/cm)	3
Densité trame (duites/cm)	2

Carte Générale

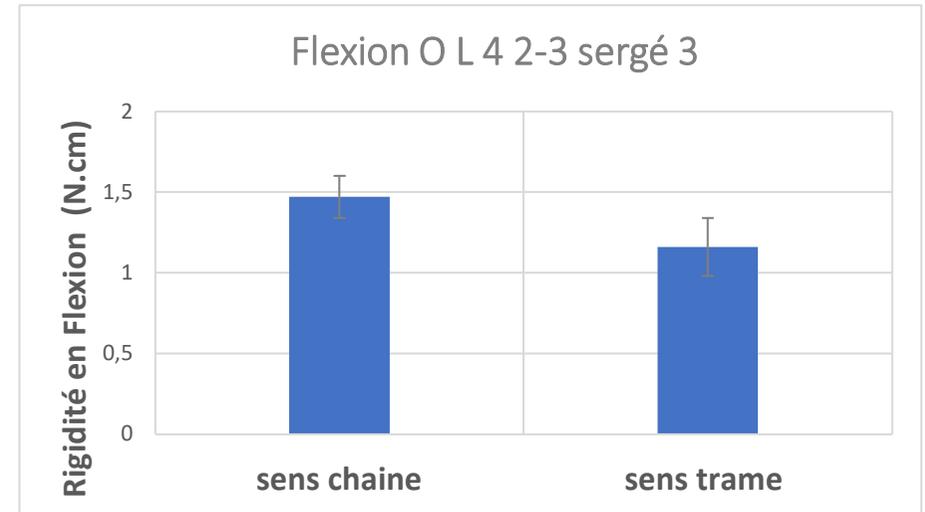


Embavage de fils de chaîne de liage (%)	
Interpli 0	7,35±3,5
Interpli 1	8,28±2,5
Embavage de fils de chaîne de Renfort(%)	
Interpli 1	2,59±0,89
Interpli 2	3,36±1,98
Interpli 3	4,15±0,43
Retrait (%)	
Couche 1	5,61±2,5
Couche 2	8,25±3,2
Couche 3	5,81±1,5
Couche 4	8,33±2,8

Fiche Technique Tissu en Fils de Sisal 3300 Tex

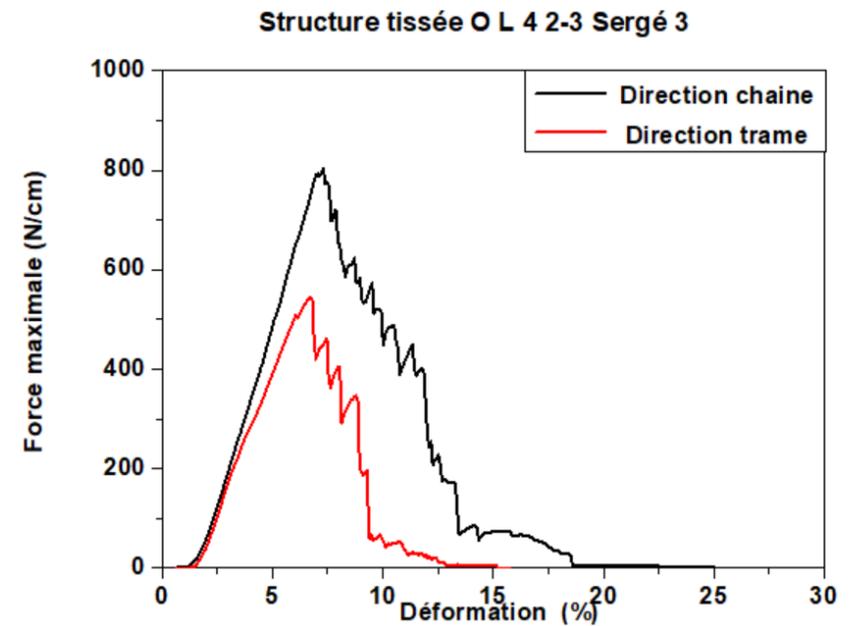
Rigidité en flexion

Sens chaîne (N.cm)	1,47 ± 0,14
Sens trame (N.cm)	1,18 ± 0,18



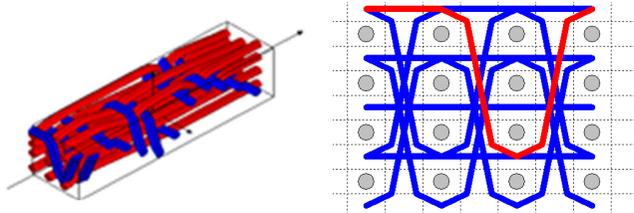
Comportement en traction chaîne et trame

	Sens chaîne	Sens trame
Force maximale au (N/cm)	798,86±44,5	523,98±35,4
Déformation à la force maximale (%)	7,10±1,83	6,10±0,97

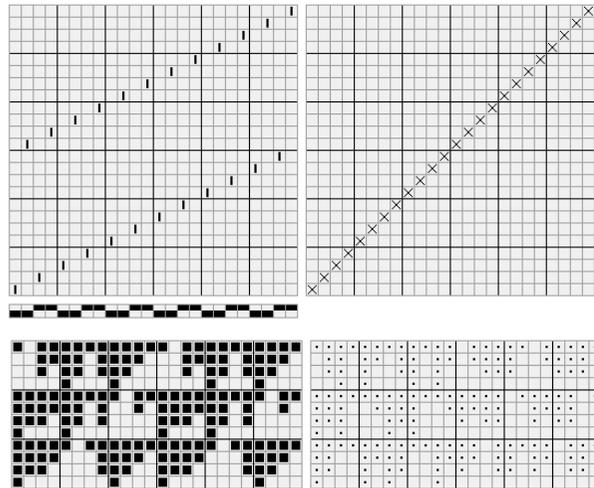


Fiche Technique Tissu en Fils de Sisal 3300 Tex

O-L 4 1-3 LIAGE {SERGE 3 EFFET CHAINE CORDON A GAUCHE}{1 5 9 - 2 6 10 - # - # - #} - RENFORT {# - 3 8 - 4 11 - 7 12 - #}



Carte Générale



Informations générales

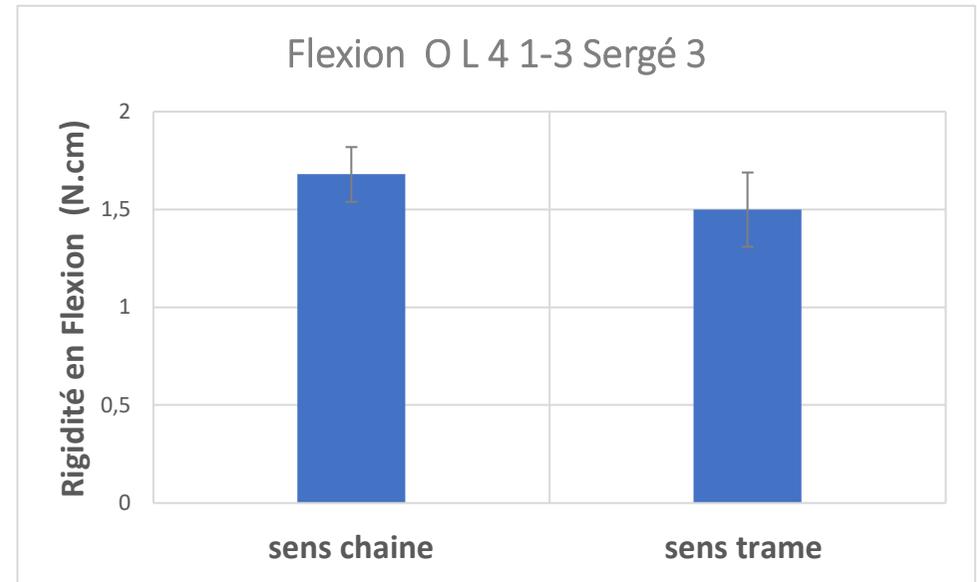
Poids (g/m ²)	2523,14± 154
Epaisseur (mm)	9 ± 0,14
Densité chaîne (fils/cm)	3
Densité trame (duites/cm)	2

Embuvement de fils de chaîne de liage (%)	
Interpli 0	8,88±1,1
Interpli 1	9,01±1,5
Embuvement de fils de chaîne de Renfort(%)	
Interpli 1	3,15±0,33
Interpli 2	4,07±0,97
Interpli 3	3,6±1,64
Retrait (%)	
Couche 1	3,47±0,96
Couche 2	4,46±1,5
Couche 3	2,28±1,5
Couche 4	3,29±1,7

Fiche Technique Tissu en Fils de Sisal 3300 Tex

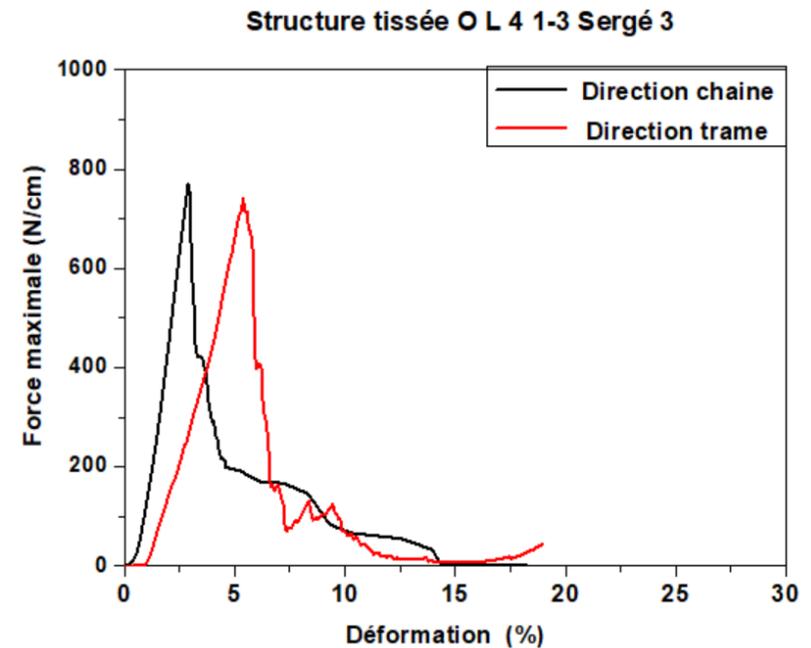
Rigidité en flexion

Sens chaîne (N.cm)	1,59 ± 0,14
Sens trame (N.cm)	1,5 ± 0,18



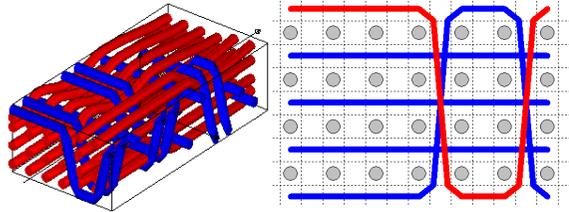
Comportement en traction chaîne et trame

	Sens chaîne	Sens trame
Force maximale (N/cm)	776,98±67,12	756,98±25,5
Déformation à la force maximale (%)	3,47±1,65	5,47±1,5



Fiche Technique Tissu en Fils de Sisal 3300 Tex

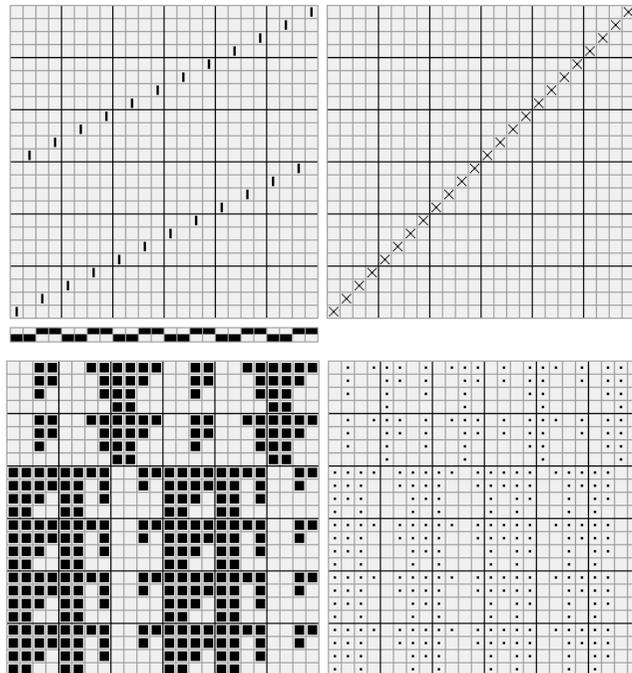
O-T 4 2-4 LIAGE {NATTE 4-2} {1 2 5 6 9 10 -# -# -# -#} – RENFORT {# – 3 8 – 4 11 – 7 12 -#}



Informations générales

Poids (g/m ²)	2807,65± 287
Epaisseur (mm)	9 ± 0,69
Densité chaîne (fils/cm)	3
Densité trame (duites/cm)	2

Carte Générale

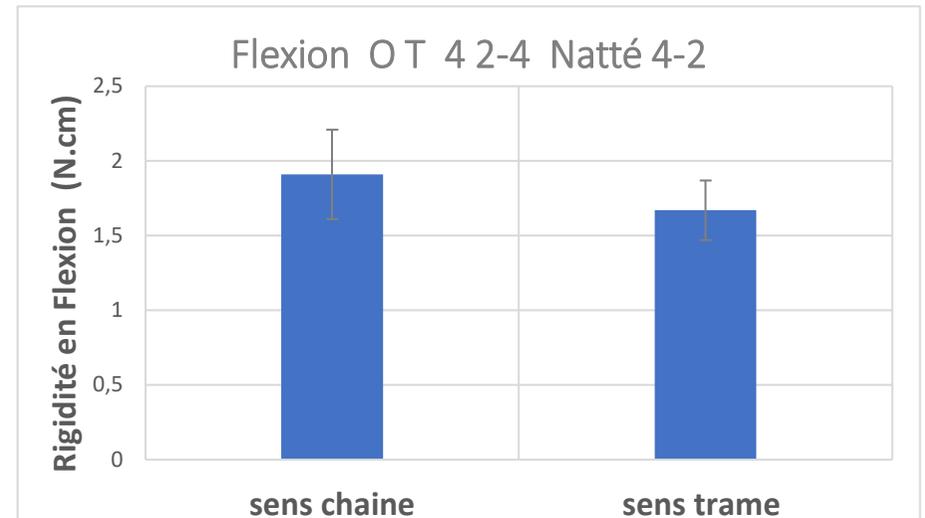


Embuvement de fils de chaîne de liage (%)	
Interpli 0	7,59 ±0,5
Embuvement de fils de chaîne de Renfort(%)	
Interpli 1	3,84±0,15
Interpli 2	2,91±0,58
Interpli 3	5,12±0,7
Retrait (%)	
Couche 1	5,95±0,9
Couche 2	4,30±0,16
Couche 3	5,16±0,36
Couche 4	6,54±0,68

Fiche Technique Tissu en Fils de Sisal 3300 Tex

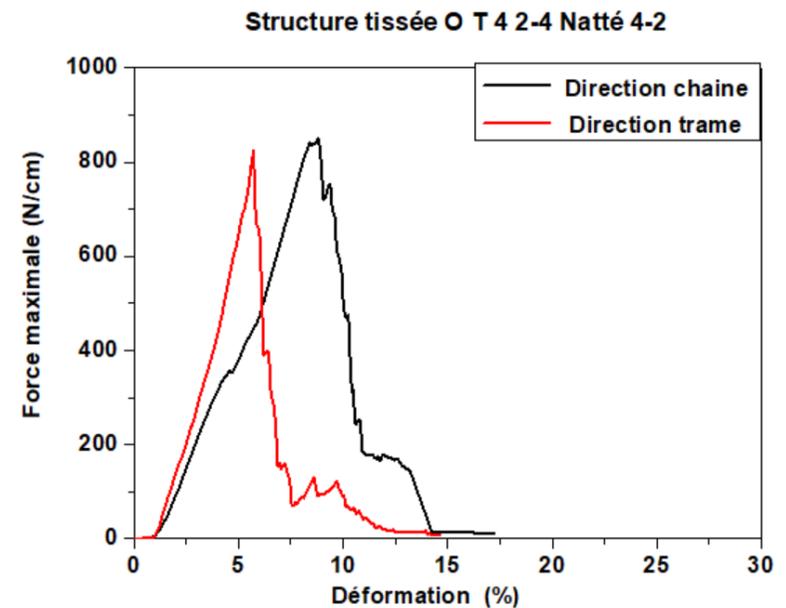
Rigidité en flexion

Sens chaîne (N.cm)	1,91 ± 0,3
Sens trame (N.cm)	1,67 ± 0,18



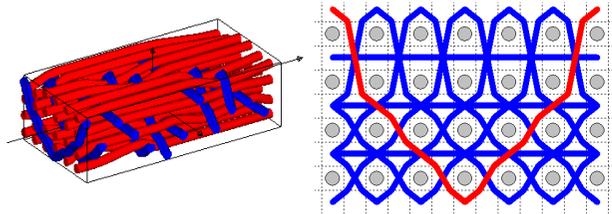
Comportement en traction chaîne et trame

	Sens chaîne	Sens trame
Force maximale (N/cm)	845,97±19,02	835,74±38,66
Déformation à la force maximale (%)	8,80±1,65	5,72±1,27

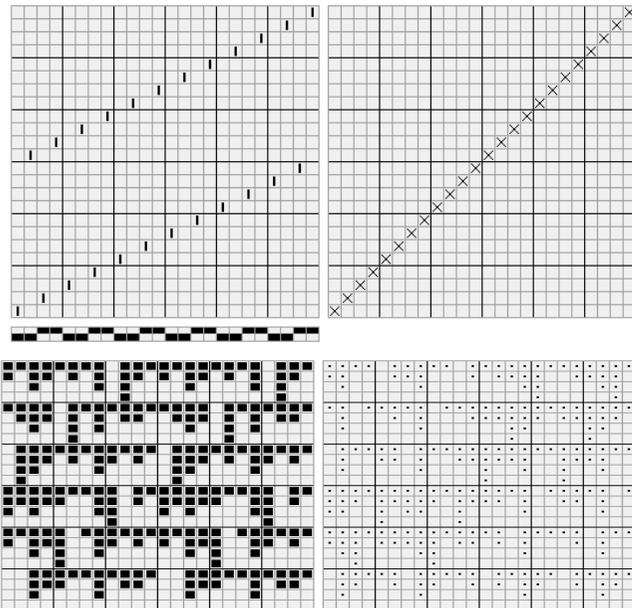


Fiche Technique Tissu en Fils de Sisal 3300 Tex

A-T 4 5-4 LIAGE {SERGE 6 FAÇONNE} {1 2 5 6 9 10 -# -# -# -#} -RENFORT {# - 3 8 - 4 11 - 7 12 -#}



Carte Générale



Informations générales

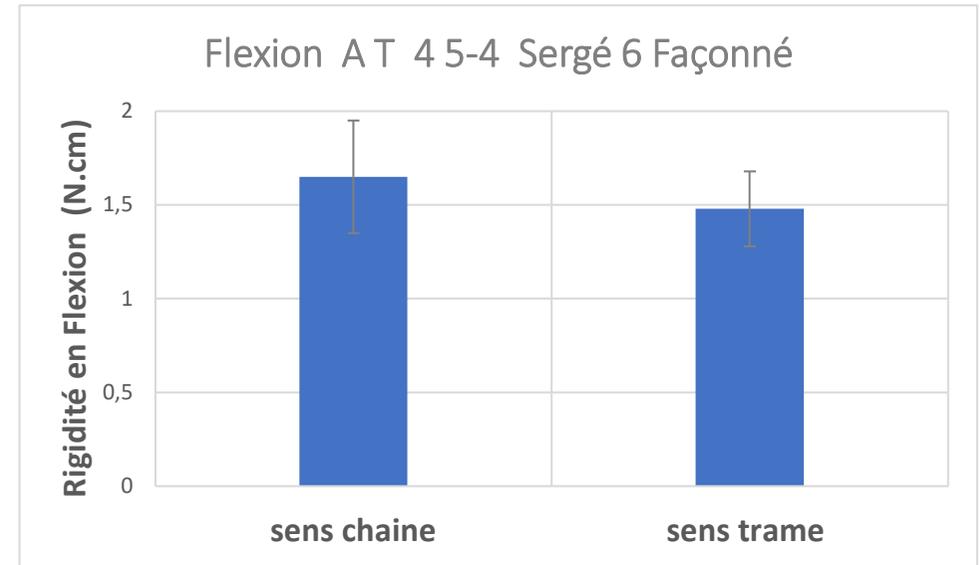
Poids (g/m ²)	2473,67±153
Epaisseur (mm)	9,08 ± 0,74
Densité chaîne (fils/cm)	3
Densité trame (duites/cm)	3

Embuvaage de fils de chaîne de liage (%)	
Interpli 0	15,12±4,2
Embuvaage de fils de chaîne de renfort(%)	
Interpli 1	4,23 ± 0,9
Interpli 2	3,25± 1,02
Interpli 3	3,02±1,6
Retrait (%)	
Couche 1	7,12±1,2
Couche 2	7,5±1,6
Couche 3	12,66±3,56
Couche 4	13,49±2,69

Fiche Technique Tissu en Fils de Sisal 3300 Tex

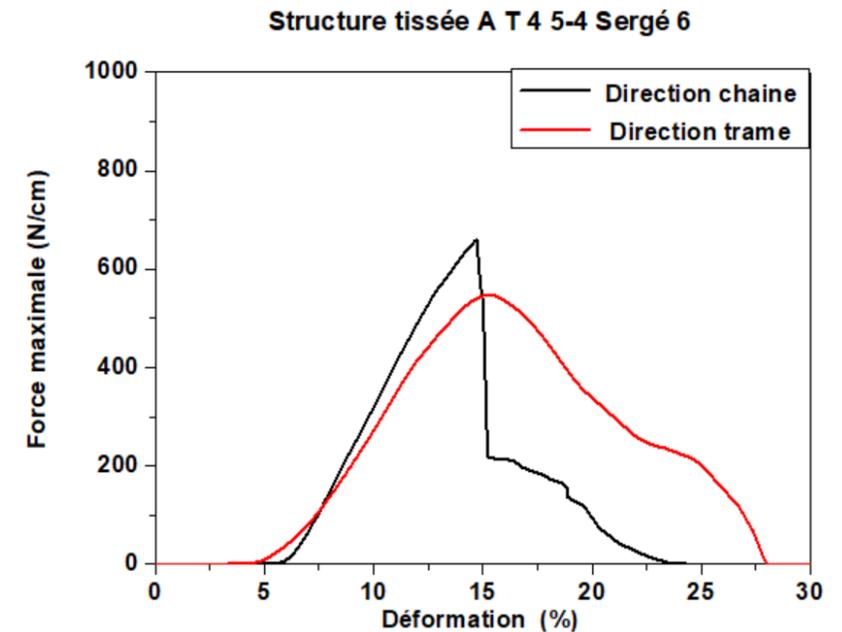
Rigidité en flexion

Sens chaine (N.cm)	1,65 ± 0,3
Sens trame (N.cm)	1,48 ± 0,2



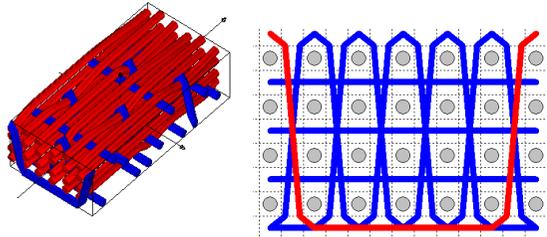
Comportement en traction chaine et trame

	Sens chaine	Sens trame
Force maximale (N/cm)	724,87 ± 36,2	565,54±11,54
Déformation à la force maximale (%)	14,72 ± 2,5	15,22±3,52

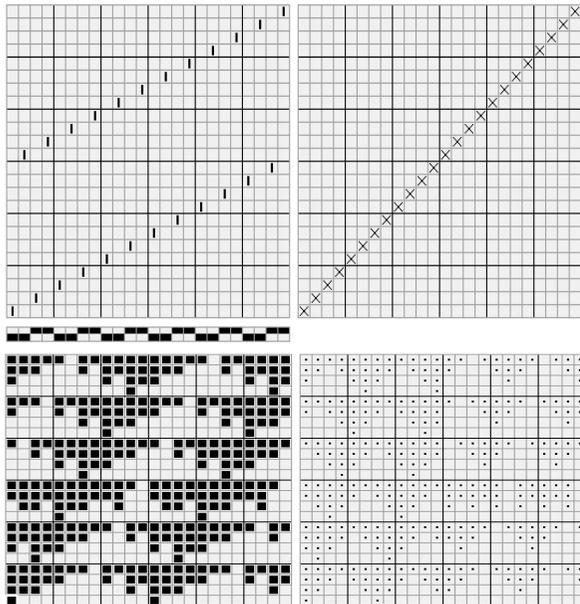


Fiche Technique Tissu en Fils de Sisal 3300 Tex

O-T 4 5-4 LIAGE {SERGE 6 FAÇONNE 1P5L-3L1P2L} {1 2 5 6 9 10 - # - # - # - #} -RENFORT {# - 3 8 - 4 11 - 7 12 - #}



Carte Générale



Informations générales

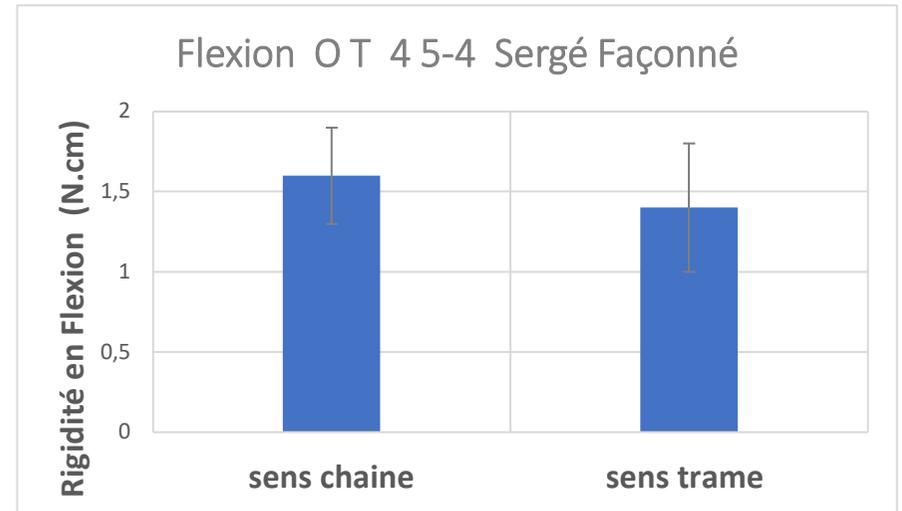
Poids (g/m ²)	2556,67± 95,65
Epaisseur (mm)	9,05 ± 1,2
Densité chaîne (fils/cm)	3
Densité trame (duites/cm)	3

Embuvage de fils de chaîne de liage (%)	
Interpli 0	16,31±0,9
Embuvage de fils de chaîne de renfort (%)	
Interpli 1	4,45±0,25
Interpli 2	3,23±0,4
Interpli 3	4,01±0,69
Retrait (%)	
Couche 1	13,04±0,48
Couche 2	11,89±0,9
Couche 3	14,52±0,7
Couche 4	10,66±0,3

Fiche Technique Tissu en Fils de Sisal 3300 Tex

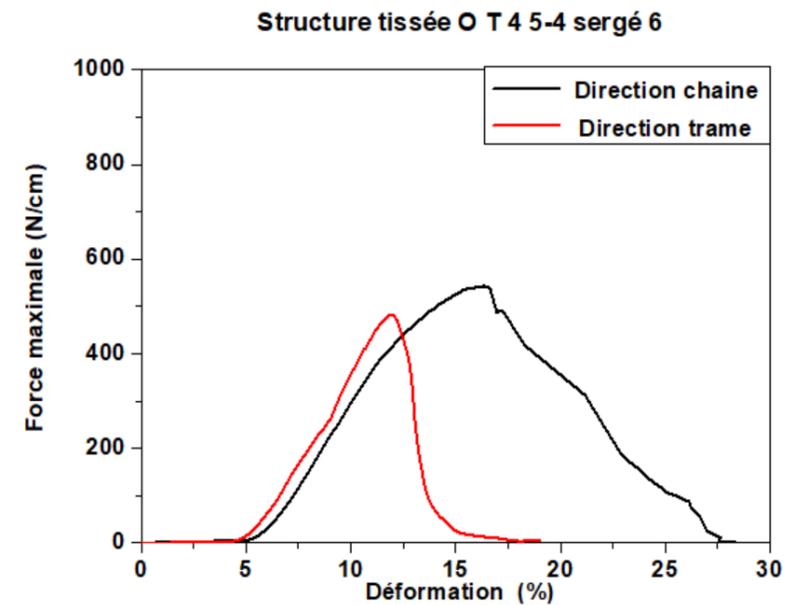
Rigidité en flexion

Sens chaîne (N.cm)	1,6 ± 0,3
Sens trame (N.cm)	1,4 ± 0,4



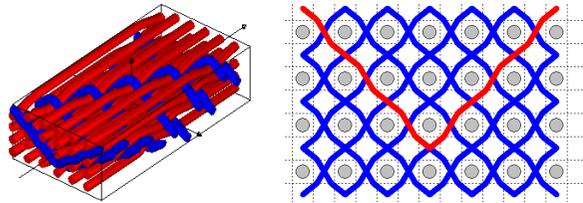
Comportement en traction chaîne et trame

	Sens chaîne	Sens trame
Force maximale (N/cm)	524,78±47,59	576,98,66±71,03
Déformation à la force maximale (%)	17,22±4,41	12,05±1,48



Fiche Technique Tissu en Fils de Sisal 3300 Tex

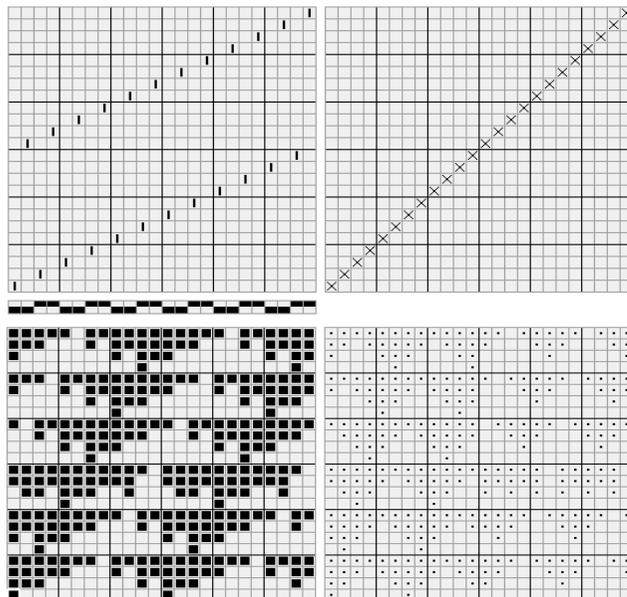
A-L 4 5-3 LIAGE {SERGE 6 EFFET TRAME CORDON A GAUCHE } {1 3 5 7 9 11 – 2 4 6 8 10 12 - # - # - # - # }



Informations générales

Poids (g/m ²)	2750,39± 105
Epaisseur (mm)	11,5 ± 0,14
Densité chaîne (fils/cm)	3
Densité trame (duites/cm)	3

Carte Générale

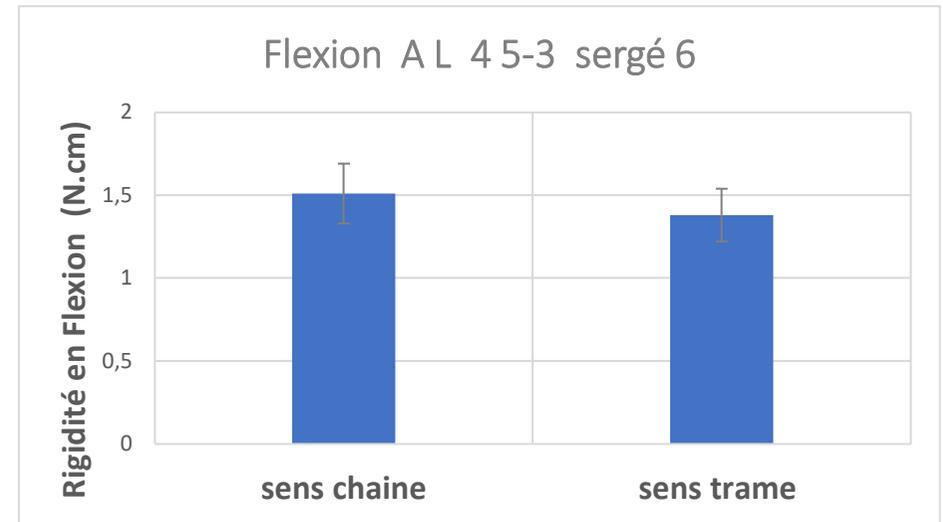


Embuvement de fils de chaîne de liage (%)	
Interpli 0	7,12±0,26
Interpli 1	6,12±0,6
Retrait (%)	
Couche 1	3,41±0,54
Couche 2	4,52±0,8
Couche 3	3,1±0,52
Couche 4	5,12±0,45

Fiche Technique Tissu en Fils de Sisal 3300 Tex

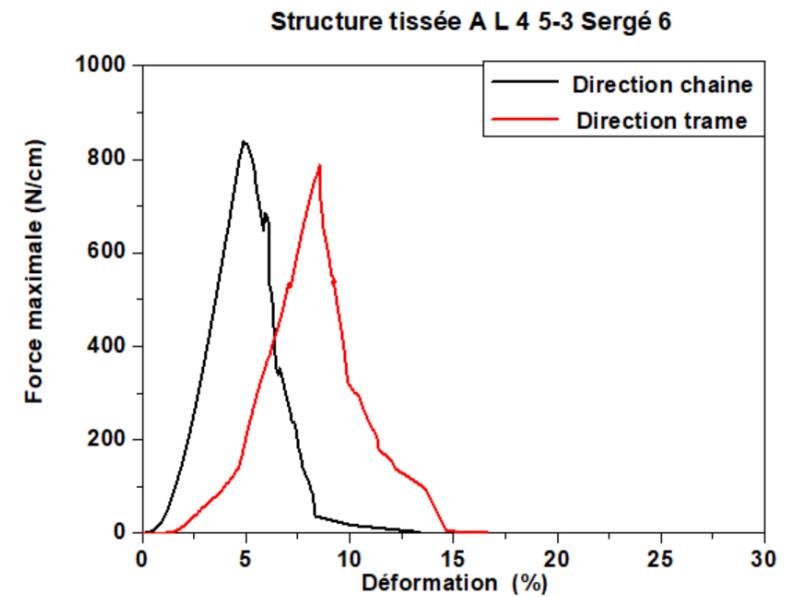
Rigidité en flexion

Sens chaîne (N.cm)	1,51 ± 0,18
Sens trame (N.cm)	1,38 ± 0,14



Comportement en traction chaîne et trame

	Sens chaîne	Sens trame
Force maximale (N/cm)	823,54 ± 30,16	764,45 ± 31,25
Déformation à la force maximale au (%)	4,8 ± 1,53	8,5 ± 1,84



Textiles à base de fibres naturelles d'origine marocaine pour application matériaux composites

Résumé

Ces travaux de thèse visent à développer et caractériser des renforts tissés en fibre de sisal d'origine marocaine pour application matériaux composites. Une approche multi-échelle du comportement de renforts tissés en fibre de sisal est menée afin de comprendre et d'évaluer les différentes propriétés de renforts tissés. L'étude à l'échelle fibre montre la variabilité des propriétés morphologiques et mécaniques en traction liée à la composition de la fibre de sisal. La transformation de la fibre en fil pour le développement des renforts tissés a conduit à étudier à l'échelle fil les facteurs influençant la tissabilité du fil. La caractérisation des propriétés physiques et mécaniques du fil de sisal révèle la variabilité de ces propriétés en liaison avec les propriétés de la fibre de sisal. Les résultats montrent l'intérêt de la prise en compte des propriétés de la fibre et du fil de sisal afin de procéder au tissage des renforts fibreux. A l'échelle tissu, des renforts tissés 2D et 3D sont élaborés en se basant sur le procédé de tissage conventionnel. L'identification des propriétés physiques et mécaniques des renforts tissés 2D et 3D permet de mettre l'accent sur les différents paramètres de production influençant la performance de ces renforts. La production et la caractérisation des plaques composites à base de renforts tissés 2D et 3D montrent le potentiel des renforts tissés en fibre de sisal par rapport aux renforts tissés en fibres naturelles issus de la littérature.

Mots clés : Fibre de sisal, Renfort tissé, Approche multi-échelle, Tissage 3D, Propriétés mécaniques, Matériaux composites

Textiles based on natural fibers of Moroccan Origin for composite Materials application

Abstract

This PhD thesis aims to develop and characterize woven Moroccan sisal fiber reinforcements for composite materials applications. A multi-scale approach of the behavior of sisal fiber woven reinforcements is conducted to understand and evaluate the different properties of woven reinforcements. The study at the fiber scale shows the variability of morphological and mechanical properties in tension related to the composition of the sisal fiber. The transformation of the fiber into yarn for the development of woven reinforcements has led to the study of the factors influencing the "weave-ability" of the yarn at the yarn scale. The characterization of the physical and mechanical properties of sisal yarn reveals the variability of these properties in relation to the properties of the sisal fiber. The results show the interest of considering the properties of the sisal fiber and yarn to proceed with the weaving of fibrous reinforcements. At the fabric scale, 2D and 3D woven reinforcements are developed based on a conventional weaving process. The identification of the physical and mechanical properties of the 2D and 3D woven reinforcements allows to focus on the different production parameters influencing the performance of these reinforcements. The production and characterization of composite sheets based on 2D and 3D woven reinforcements show the potential of sisal fiber woven reinforcements compared to natural fiber woven reinforcements from literature.

Keywords: Sisal fiber, Woven reinforcement, Multiscale approach, 3D- weaving, Mechanical properties, Composite materials